



Bachelorarbeit

Herr
Maik Reif

**Einfluss des zeitlichen Pulsab-
standes auf den Materialabtrag
im Burst Modus**

Mittweida, 2021

Bachelorarbeit

Einfluss des zeitlichen Pulsabstandes auf den Materialabtrag im Burst Modus

Autor:
Herr

Maik Reif

Studiengang:
Lasertechnik / Physikalische Technik

Seminargruppe:
LT18wL-B

Erstprüfer:
Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

Zweitprüfer:
Daniel Metzner, M.Sc.

Einreichung:
Mittweida, den 30 September, 2021

Bachelor thesis

Influence of the temporal pulse separation on the material removal in burst mode

author:

Mr.

Maik Reif

course of studies:

laser technology / physical engineering

seminar group:

LT18wL-B

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel

second examiner:

Daniel Metzner, M.Sc.

submission:

Mittweida, 30 september, 2021

Bibliografische Angaben

Reif, Maik:

Einfluss des zeitlichen Pulsabstandes auf den Materialabtrag im Burst Modus - 2021 -

Seitenzahl Verzeichnisse: 20,

Seitenzahl des Inhalts: 63

Seitenzahl der Anhänge: 22.

Mittweida, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2021

Abstract

In dieser Arbeit wurde die Abtragseffizienz und -qualität von Edelstahl unter Verwendung ultrakurzer Laserpulse untersucht und diskutiert. Zur Durchführung der Versuche stand eine Pikosekunden-Laseranlage mit einer emittierenden Laserstrahlung im nahen Infrarotbereich (NIR) zur Verfügung, womit Flächenabträge in Abhängigkeit von der Fluenz im Einzelpuls- sowie im Burst-Modus erzeugt wurden. Des Weiteren wurde der zeitliche Abstand zwischen den Pulsen und die Anzahl der Pulse innerhalb eines Pulszuges variiert.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik.....	3
3 Theoretische Vorbetrachtungen	5
3.1 <i>Charakterisierung gepulster Laserstrahlung.....</i>	5
3.1.1 Gauß'sche Pulse - räumlichen Strahlverteilung.....	5
3.1.2 Gauß'sche Pulse - zeitliche Strahlverteilung.....	6
3.1.3 Einkopplung elektromagnetischen Energie in Material	8
3.2 <i>Ablationsschwelle</i>	11
3.3 <i>Inkubation</i>	12
3.4 <i>Ablation von Metall mit ultrakurzen Einzel- und Doppelpulsen.....</i>	13
3.5 <i>Ablation von Metall mit Multipulsen.....</i>	19
4 Experimentelle Details	22
4.1 <i>Laserstrahlquelle und -führung.....</i>	22
4.2 <i>Probenmaterial.....</i>	23
4.3 <i>Untersuchter Parameterbereich</i>	25
4.4 <i>Analysemethoden.....</i>	29
5 Ergebnisse und Diskussion	33
5.1 <i>Einzelpulsmodus.....</i>	33
5.2 <i>Burst-Modus</i>	37
5.2.1 <i>Doppelpulse (Burst-Modus (N=2)).....</i>	37
5.2.2 <i>Multipulse</i>	46
5.3 <i>Vergleich</i>	57
6 Zusammenfassung	62
7 Literaturverzeichnis.....	XII
8 Anhang.....	XVIII
Danksagung.....	XXXVI
Eigenständigkeitserklärung	XXXVII

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Erklärung	Grundeinheit
A	Absorptionsgrad	
d	Abtragsstiefe	m
f	Frequenz	$\frac{1}{s}$ Hz
f_P	Pulswiederholffrequenz	$\frac{1}{s}$ Hz
H	Fluenz	$\frac{J}{\text{cm}^2}$
H_0	Spitzenfluenz	$\frac{J}{\text{cm}^2}$
H_{th}	Schwellfluenz	$\frac{J}{\text{cm}^2}$
ΔH_s	Sublimationsenthalpie	J
I	Intensität	$\frac{W}{\text{cm}^2}$
I_0	Spitzenintensität	$\frac{W}{\text{cm}^2}$
N	Pulsanzahl	
P	Leistung	W
P_0	Maximale Laserleistung	W
P_{av}	Mittlere Laserleistung	W
Q	Pulsenergie	J
R	Reflexionsgrad	
S	Inkubationsfaktor	

s	Überfahrtenanzahl	
S_a	Mittlere Oberflächenrauheit	μm
S_q	quadratische Oberflächenrauheit	μm
S_z	Maximale Höhe der Oberflächenrauheit	μm
V_P	Abtragsvolumen pro Puls	m^3
w_0	Strahlradius bei $\frac{I_0}{e^2}$	m
α	Absorptionskoeffizient	
δ	Optische Eindringtiefe	m
κ	Extinktionskoeffizient	
λ	Wellenlänge	m
η	Effizienz	$\frac{\text{m}^3}{\text{J}}$
ρ	Materialdichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
τ_{FWHM}	Halbwertsbreite (Full Width Half Maximum)	s
τ_P	Pulsdauer	s

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Halbwertsbreite FWHM und Pulsdauer τ_P bei einer Intensitätsverteilung mit Gaußprofil..... 7
- Abbildung 2:** Schematische Darstellung der einfallenden Spitzenintensität I_0 rot, der reflektierte Intensitätsanteil IR orange, der absorbierte Intensitätsanteil IA grün und der transmittierte Intensitätsanteil IT dunkelblau dargestellt. Der elektromagnetische Strahl fällt dabei aus einem optisch dünnen Medium n_1 auf ein optisch dichtes Medium n_2 ein. 9
- Abbildung 3:** Darstellung des Intensitätsverlaufs beim Auftreffen von Laserstrahlung (rot) auf eine Grenzfläche und die exponentielle Dämpfung der Intensität ins Material-innere. 10
- Abbildung 4:** Schematische Darstellung des Inkubationseffektes 12
- Abbildung 5:** Darstellung der Ergebnisse einer Simulation der Molekular Dynamik bei der Verwendung eines Laserstrahls im Einzelpulsmodus mit Propagation auf Aluminium. Die räumlichen Koordinaten sind beginnend mit $z = 0$ nm (der Materialoberfläche) an der Abszisse angetragen. An der Ordinate befindet sich die Laufzeit der Simulation mit dem Maximum des Laserpulses bei 5 ns. Die Farben des Temperaturfeldes entsprechen gleichzeitig der Dichte des Aluminium-Materials in g/cm^3 und werden im aufrechten Balken rechts dargestellt. Die Bereiche ohne Einwirkung werden weiß hervorgehoben. Mit einem Ansteigen der Fluenz, betrachtet von der Oberfläche in Richtung des Bodens, erreicht das Material verschiedene Regime. Diese reichen vom Aufschmelzen (Heating/Melting) der Materialoberfläche, bei der es zu keiner Ablation kommt, bis zur Phasenexplosion, bei der es zu einem Austrag durch eine sehr stark ausgeprägte Verdampfung und Ionisation des Materials kommt. Im Aufbruchs-Regime (Spallation) (mittlere Darstellung) kommt es zu einer Ablation, für die ein Aufbrechen der Materialoberfläche charakteristisch ist. Dieses Phänomen führt in der Folge zu sehr hohen Oberflächenqualität mit geringen mittleren Oberflächenrauheitswerten und gut definierbaren Abtragstiefen während der Laserbearbeitung. Die hervorgerufene Stoßwelle wird dabei mit SW und die Verdünnungswelle mit RW abgekürzt und dargestellt [19]..... 14
- Abbildung 6:** Darstellung der Abtragsvolumen in Abhängigkeit zur eingekoppelten Energie bei Nutzung des Einzelpulsmodus mit einer Wellenlänge im nahen Infrarotbereich für verschiedene Metalle. Für die an der Abszisse angetragene Fluenz wurde eine Normalisierung vorgenommen, da verschiedene Metalle unterschiedliche Schwellfluenzen aufweisen [19]. 15
- Abbildung 7:** Schematische Darstellung der Wärmeakkumulation bei der Verwendung von mehr als zwei Pulsen (links ohne, rechts mit Wärmeakkumulation) [21]. 15

Abbildung 8:	Skizzenhafte Darstellung der Ablation mittels konventioneller gepulster Laserstrahlung (Low-repetition-rate laser) und ultrakurzgepulster Laserstrahlung (High-repetition-rate laser) [33]...	16
Abbildung 9:	Skizzenhafte Darstellung der zeitlichen Pulsabstände des Einzelpulsmodus (EP) (oben) und Burst-Modus mit zwei (Mitte) und drei Pulsen pro Burst (unten).....	17
Abbildung 10:	Schematische Darstellung des Ablationsprozesses in Abhängigkeit von der Zeit [54].	18
Abbildung 11:	Darstellung der Abtragsprozesse bei der Nutzung von einem, zwei und drei Pulsen innerhalb eines Zeitintervalls von 200 ns beginnend mit dem jeweils ersten Puls. Die Bereiche mit höheren Teilchendichten werden hierbei farblich für die Schwellwerte von 40% (rot), 50% (schwarz) und 75% (blau) hervorgehoben. Bei den tatsächlichen Messungen wurde ein zeitlicher Abstand von 10 ns genutzt. Die Teilstriche an den Rändern der Bilder entsprechen einem geometrischen Abstand von 10 μm . Der Startpunkt der Pulse wird durch die dicken roten Linien markiert [39].....	20
Abbildung 12:	Darstellung der Ergebnisse einer Simulation für eine Spitzenfluenz H_0 von 1,5 J/cm ² für einen zeitlichen Pulsabstand τ_P von 10 ps. Oberes Diagramm: Die Temperaturentwicklung des Elektronen-System T_e und Phononen-System T_{ph} in Abhängigkeit der Zeit t . Unteres Diagramm: Die Wärmeverteilung des Phononen-Systems in Abhängigkeit der Zeit. Die schmelzflüssige Phase wird mit einer roten Linie hervorgehoben [61].	21
Abbildung 13:	Schematische Darstellung der Strahlführung.....	22
Abbildung 14:	Exemplarische Darstellung der Vermessung des Strahlprofiles mit dem Primes MicroSpotMonitor	23
Abbildung 15:	Lichtmikroskop-Aufnahme eines martensitischen Chromstahls [63]	24
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der durch den Einzelpulsmodus (EP) erzeugten Flächenabträge unter Variation der Fluenz von 1,5° J/cm ² bis 8,0° J/cm ²	25
Abbildung 17:	Beispielhafte Darstellung der gleichmäßigen Energieverteilung pro Puls im Burst-Modus mit drei Pulsen pro Burst.....	26
Abbildung 18:	Beispielhafte Darstellung der aufsteigenden Energieverteilung pro Puls im Burst-Modus mit drei Pulsen pro Burst. (Die absteigende Energieverteilung gilt analog)	26
Abbildung 19:	Schematische Darstellung der durch den Burst-Modus mit zwei Pulsen ($N = 2$) pro Burst erzeugten Flächenabträge unter Variation der Gesamtfluenz von 1,5° J/cm ² bis 8,0° J/cm ² , der Energieverteilung je Puls in eines Bursts (gleichmäßige, aufsteigende und absteigende Verteilung) und Änderung der zeitlichen Pulsabstände von 12,5 ns bis 87,5 ns	27

- Abbildung 20:** Schematische Darstellung der durch die Burst-Modi mit drei Pulsen ($N = 3$) pro Burst und vier Pulsen ($N = 4$) pro Burst erzeugten Flächenabträge unter Variation der Gesamtfluenz von $6,0^\circ \text{J/cm}^2$ für $N = 3$ bzw. $8,0^\circ \text{J/cm}^2$ für $N = 4$, der Energieverteilung je Puls innerhalb eines Bursts (gleichmäßige, aufsteigende und absteigende Verteilung) und Änderung der zeitlichen Pulsabstände von 12,5 ns bis 37,5 ns für $N = 3$ bzw. 12,5 ns bis 25,0 ns für $N = 4$ 28
- Abbildung 21:** Schematische Darstellung der Überfahrtsführung zur Erzeugung der Flächenabträge..... 28
- Abbildung 22:** Das linke Bild bietet die frontale und das rechte Bild die seitliche Ansicht des Olympus OLS4100 29
- Abbildung 23:** Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der konfokalen Laserscanning-Mikroskopie 30
- Abbildung 24:** Das verwendete REM Jeol JSM-6510LV 32
- Abbildung 25:** linke Ordinate: Abhängigkeit des Abtragsvolumens von der Fluenz, rechte Ordinate: Abhängigkeit der Abtragseffizienz von der Fluenz, bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Einzelpulsmodus..... 34
- Abbildung 26:** Oberflächenrauheiten der erzeugten Strukturböden bei der Verwendung des Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen in Abhängigkeit von der Fluenz und einer Überfahrtenanzahl von 30. . 34
- Abbildung 27:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Einzelpulsmodus bei den Fluenzen von 1 - 8 J/cm^2 35
- Abbildung 28:** Schematische Darstellung des Auftretens von Abtragsunterschieden bei unterschiedlicher Artung der Oberfläche mit welcher der Laserstrahl wechselwirkt. Der einfallende Strahlanteil wird hierbei orange, der reflektierte Strahlanteil blau und in der Folge erneut reflektierte Strahlanteil grün dargestellt..... 36
- Abbildung 29:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm^2 , 3,0 J/cm^2 , 6,0 J/cm^2 und 8,0 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von 1/2 (erster Puls) und 1/2 (zweiter Puls)..... 38
- Abbildung 30:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm^2 , 3,0 J/cm^2 , 6,0 J/cm^2 und 8,0 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von 1/4 (erster Puls) zu 3/4 (zweiter Puls). 38

- Abbildung 31:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$, $3,0 \text{ J/cm}^2$, $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls)..... 38
- Abbildung 32:** Gegenüberstellung der Abtragsvolumen pro Puls innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$, $3,0 \text{ J/cm}^2$, $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls)..... 40
- Abbildung 33:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$, $3,0 \text{ J/cm}^2$, $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls)..... 43
- Abbildung 34:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$, $3,0 \text{ J/cm}^2$, $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls)..... 43
- Abbildung 35:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$, $3,0 \text{ J/cm}^2$, $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls)..... 43
- Abbildung 36:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $8,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls)..... 45
- Abbildung 37:** Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig..... 47
- Abbildung 38:** Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte ansteigend. 47

- Abbildung 39:** Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte absteigend. 48
- Abbildung 40:** Darstellung der im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts abgetragenen Volumenanteils der einzelnen Pulse bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 mit einem Vergleich zum Volumenabtrag des im Einzelpulsmodus mit einer Fluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 50
- Abbildung 41:** Darstellung der im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung verschiedener Energieverteilungen (gleichmäßig, ansteigend und absteigend.) 51
- Abbildung 42:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit drei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $6,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes von $12,5 \text{ ns p. P.}$ bis $37,5 \text{ ns p. P.}$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig, ansteigend und absteigend gemäß der beschriebenen Gesamtverteilung. 52
- Abbildung 43:** Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 53
- Abbildung 44:** Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte ansteigend. 53
- Abbildung 45:** Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte absteigend. 54
- Abbildung 46:** Darstellung der im Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts abgetragenen Volumenanteils der einzelnen Pulse bei einer Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 mit einem Vergleich zum Volumenabtrag des im Einzelpulsmodus mit einer Fluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 55

- Abbildung 47:** Darstellung der im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung verschiedener Energieverteilungen (gleichmäßig, ansteigend und absteigend.) 56
- Abbildung 48:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit drei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $8,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes von $12,5 \text{ ns p. P.}$ bis $25,0 \text{ ns p. P.}$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig, ansteigend und absteigend nach den prozentual beschriebenen Aufteilungen. 56
- Abbildung 49:** Tropfenförmige Wiederablagerung von ablatierten Material durch die Wechselwirkung eines Folgepulse mit einer gegebenen Ablationswolke. 57
- Abbildung 50:** Darstellung der Abtragsverhalten der durch einen Puls im Burst erzeugten Abtragsvolumen in Abhängigkeit zur Pulsposition innerhalb eines Bursts bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 ($N=3$) (links) und von 8 J/cm^2 ($N=4$) im Multi-Burst-Modus. 57
- Abbildung 51:** Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls ($N=3$) erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 58
- Abbildung 52:** Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls ($N=4$) erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 58
- Abbildung 53:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a und dem Spitzenwert S_z in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ für verschiedene Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)). 59
- Abbildung 54:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ für verschiedene Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)). 59
- Abbildung 55:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ für verschiedene Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)). 60

- Abbildung 56:** Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung verschiedener Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)). 60
- Abbildung 57:** Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls ($N=4$) erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 61
- Abbildung 58:** Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls ($N=4$) erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig. 61
- Abbildung 59:** Darstellung der Energieverteilung Anhand eines Oszilloskops für den Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts (Gleiche Energieverteilung links, absteigende Energieverteilung mittig und ansteigende Energieverteilung rechts)..... XXXIII
- Abbildung 60:** Darstellung der Energieverteilung Anhand eines Oszilloskops für den Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts (Gleiche Energieverteilung links, absteigende Energieverteilung mittig und ansteigende Energieverteilung rechts)..... XXXIII
- Abbildung 61:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $1,50 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls). XXXIV
- Abbildung 62:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $1,50 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls). XXXIV
- Abbildung 63:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $1,50 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls). . XXXV
- Abbildung 64:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $3,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls). XXXV
- Abbildung 65:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $3,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls). XXXVI

- Abbildung 66:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $3,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls). .XXXVI
- Abbildung 67:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $6,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls).
.....XXXVII
- Abbildung 68:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $3,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls). XXXVII
- Abbildung 69:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $6,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls).
.....XXXVIII
- Abbildung 70:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $8,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls).
.....XXXVIII
- Abbildung 71:** Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $8,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls). .XXXIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Oberflächenrauheiten der Strukturböden bei der Verwendung von ultrakurzen Einzelpulsen in Abhängigkeit von der Fluenz XVIII
Tabelle 2:	Ermittelte Werte der Abtragstiefen und den daraus berechneten Abtragsvolumen bzw. Abtragseffizienzen für einen Fluenzbereich von $0,75 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 bei Verwendung des Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen XVIII
Tabelle 3:	Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25). XIX
Tabelle 4:	Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $2,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25). XX
Tabelle 5:	Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25). XXI
Tabelle 6:	Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $4,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25). XXII
Tabelle 7:	Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25). XXIII

- Tabelle 8:** Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulspulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25)..... XXIV
- Tabelle 9:** Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Burst-Modus mit drei ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $37,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (33,3/33,3/33,3), ansteigend (14,3/28,6/57,1) und absteigend (57,1/28,6/14,3). XXV
- Tabelle 10:** Berechnete Abtragsvolumen für den ersten Puls P_1 , zweiten Puls P_2 und dritten Puls P_3 für eine Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Burst-Modus mit drei ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $37,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (33,3/33,3/33,3), ansteigend (14,3/28,6/57,1) und absteigend (57,1/28,6/14,3). XXV
- Tabelle 11:** Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Burst-Modus mit vier ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts mit $12,5 \text{ ns}$ und $25,0 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (25/25/25/25), ansteigend (7,7/15,4/30,8/46,2) und absteigend (46,2/30,8/15,4/7,7). XXVI
- Tabelle 12:** Berechnete Abtragsvolumen für den ersten Puls P_1 , zweiten Puls P_2 , dritten Puls P_3 und vierten Puls P_4 für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Burst-Modus mit vier ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts mit $12,5 \text{ ns}$ und $25,0 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (25/25/25/25), ansteigend (7,7/15,4/30,8/46,2) und absteigend (46,2/30,8/15,4/7,7). XXVI
- Tabelle 13:** Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für einen Fluenzbereich von $0,75 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 bei Verwendung des Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen XXVII
- Tabelle 14:** Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$ und $2,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$ XXVIII
- Tabelle 15:** Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für die Gesamtfluenzen $3,0 \text{ J/cm}^2$ und $4,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen

Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von 12,5 ns bis 87,5 ns.....XXIX

Tabelle 16: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für die Gesamtfluenzen $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von 12,5 ns bis 87,5 ns.....XXX

Tabelle 17: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für eine Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Multipulsmodus mit drei ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von 12,5 ns bis 37,5 nsXXXI

Tabelle 18: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Multipulsmodus mit vier ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts für mit 12,5 ns und 25,0 ns.....XXXII

1 Einleitung

Die stete Weiterentwicklung bestehender Bearbeitungsprozesse zur Optimierung der Langlebigkeit und Ressourcenschonung von Werkzeugen und Bauteilen sowie der Einsatz in neuen Anwendungsbereichen stellen ansteigende Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe. Aufgrund ihrer besonders hohen Verschleißfestigkeit, Härte und Korrosionsbeständigkeit werden mit Edelstahl, genauer martensitischen Chromstahl, hervorragende Standzeiten von Werkzeugen in der Werkzeugindustrie (Scheren), im Maschinenbau (Schermesser) sowie in der Kunststoffverarbeitung (Formeneinsätze) erzielt.

Die im Vergleich zum konventionell eingesetzten Schnellarbeitsstahl höhere Verschleißfestigkeit und Zähigkeit ermöglicht wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeiten, wodurch die Produktionsgeschwindigkeit und die Standzeit deutlich gesteigert werden [1].

Trotz der hohen Härte und Zähigkeit gibt es nur wenige Einschränkungen bei der Wahl der möglichen Werkstoffe für die Bearbeitung von martensitischen Chromstählen. Speziell von kohlenstoffhaltigen Bearbeitungswerkzeugen, wie Diamant oder einer Diamantbeschichtung, sollte bei hohen Prozesstemperaturen abgesehen werden, da das Element Eisen im Edelstahl eine Affinität zum Kohlenstoff besitzt und Letzteres zunehmend in den Edelstahl diffundiert [2].

Etablierte Mikro-Oberflächenbearbeitungsverfahren von martensitischen Chromstählen sind das Erodieren mittels elektrischer Funkenerosion (EDM – electrical discharge machining), das trockene, sowie nasschemische bzw. physikalische Ätzen und das Ablatieren mittels Laserstrahlung. Bedingt durch den elektroerosiven Prozess der Funkenerosion mit einem Draht als Elektrode wird allerdings die Komplexität der Bauteilgeometrie deutlich eingeschränkt und auch der laterale Bereich der Bearbeitungsstelle wird stark von der hervorgerufenen Wärme beeinflusst. Die Folgen sind Einschränkungen bei Wahl von Bauteilstrukturen, ausgeprägte wärmebeeinflusste Zonen durch die hervorgerufene Erosion und eine durch den Drahtdurchmesser festgelegte Feinheit des Materialabtrags im Mikrometerbereich. Eine weitere Einschränkung des EDM-Prozesses stellt der Einsatz bei ausschließlich elektrisch leitfähigen Werkstoffen dar. Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit von Chromstählen gehen mit den Ätzverfahren der Mikrobearbeitung größere Herausforderung einher. Zusätzlich müssen auch die Bildung von chemischen Abprodukten und die Einschränkung bei der Wahl der Bauteilgeometrie als zu berücksichtigende Nachteile genannt werden. Das hierbei abschließend genannte Verfahren stellt einen Abtragsprozess dar, der durch eine extrem

schnelle Einkopplung der Pulsenergie bei ultrakurz gepulster Laserstrahlung eintritt. Die Nutzung der laserinduzierten Bearbeitung hat sich für diffizilere Geometrien und für die Erzeugung von feineren Strukturen im Nanometerbereich, sowie nicht leifähigen Materialien, als entsprechend geeigneter herausgestellt. Auch andere konventionelle Methoden zur Bearbeitung von martensitischen Chromstahl, wie beispielsweise das Zerspanen oder das Schneiden, stehen trotz aller Fortschritte vor technischen und kostenintensiven Herausforderungen. Durch die Bearbeitung von martensitischen Chromstahl mit Laserstrahlung können die genannten Einschränkungen dabei nicht nur deutlich minimiert, sondern auch effizienter gestaltet werden. Aktuelle Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen bieten gegenwärtig schon deutlich höhere mittlere Laserleistungen, wie sie bei einem effizienten Ablationsprozess für die Mikrobearbeitung notwendig sind.

Im Rahmen dieser Arbeit soll der Materialabtrag und die Oberflächentopologie auf martensitischen Chromstahl mittels ultrakurzer Pulse bzw. hochfrequenter Puls-Gruppen untersucht werden. Vorbetrachtet werden physikalische Grundlagen über die Wechselwirkung von ultrakurz gepulster Laserstrahlung mit der Materialoberfläche sowie Kenntnisse über das Verhalten des Materialabtrags bei einer Variation von Bearbeitungsparametern.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit werden im Stand der Technik konventionelle Verfahren zur Mikrostrukturierung von martensitischen Chromstahl-Edelstahl vorgestellt. Anschließend werden die Grundlagen zur Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie sowie die Charakterisierung ultrakurzgepulster Laserstrahlung präsentiert. Nachfolgend wird der experimentelle Aufbau erläutert, indem Anlagenkomponenten, Versuchsdurchführung, Probenmaterial sowie verwendete Messinstrumente und Analysemethoden zu finden sind. Die ermittelten Ergebnisse werden im letzten Teil der Arbeit vorgestellt und diskutiert, um abschließend eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse präsentieren zu können.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel dient der Vorstellung der etablierten Verfahren zur Bearbeitung von Edelstählen. Konventionelle Verfahrensprozesse zur Bearbeitung von martensitischen Chromstählen sind wie in der Einleitung schon genannt unter anderem das aus der Mikrosystemtechnik bekannte Verfahren des trocken, nasschemischen bzw. physikalischen Ätzens. Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit von Chromstählen gehen mit diesen Verfahren der Mikrobearbeitung eine größere Herausforderung einher. Der Passivierungsneigung von Edelstählen muss aufwendig entgegengewirkt werden, da während des Ätzprozesses eine Oxidschicht entsteht, welche eine weitere Bearbeitung unmöglich werden lässt [3]. Des Weiteren bilden sich bei diesem Verfahren chemische Abprodukte und es gibt Einschränkungen bei den Bauteilgeometrien. Komplexere Strukturen sind mit einem solchen Verfahren ebenso wenig möglich. Weitere Möglichkeiten um Edelstähle zu bearbeiten bieten die mechanischen Verfahren, wie das Schleifen, das Zerspanen oder das ebenfalls schon genannte Erodieren [4]. Das Edelstahlschleifen erfolgt durch die Bearbeitung mit Hartstoffen, die eine höhere Härte als das zu bearbeitende Edelstahl aufweisen. Für das Schleifen von martensitischen Chromstählen kommen Schleifscheiben mit unterschiedlichen Korngrößen, Konzentrationen oder auch Bindungen zum Einsatz. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch die Einschränkung der Bauteilgeometrie auf plane Flächen [5,6]. Für die Erzeugung von Mikrostrukturen ist das Schleifen demnach gänzlich ungeeignet. Das Funkenerodieren als ein thermisch abtragendes Fertigungsverfahren, das auf elektrischen Entladevorgängen (Funken) zwischen einer Elektrode (Werkzeug) und der Edelstahloberfläche beruht, geht mit einem großen Nachteil einher. Dieser wird durch das generelle Auftreten höherer Schädigungen der Randzone, die auf den thermischen Charakter des Verfahrens zurückzuführen sind, hervorgerufen [6]. In Folge des Bearbeitungsvorgangs wird eine Eigenspannungszone induziert sodass Risse auftreten, die teilweise bis tief in das Grundmaterial hineinreichen. Die Entstehung von Schädigungen der Randzone bei anliegenden hohen Spannungen, die durch elektrochemische Vorgänge in der Phase vor der Zündung entstehen, muss hierbei ebenso berücksichtigt werden. Des Weiteren ist die Herstellung und die Einrichtung der Elektrode sehr kostspielig und zeitintensiv. Für die Erzeugung von sehr komplexen Strukturen im Nanometer- bis Mikrometerbereich eignet sich allerdings keine dieser Methoden. Einzig die Verwendung ultrakurz gepulster Laserstrahlung eröffnet zu diesem Zweck ganz neue Perspektiven.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den Verfahren der Mikrosystemtechnik durch die vorgestellten Verfahren eine Einschränkung auf die geometrische Form des Bauteils und die Schädigung der Materialoberfläche durch thermische

Einflüsse erfolgt. Die Herstellungs- und Einrichtungszeiten einer Elektrode sind gleichsam stets zu berücksichtigen, da sich diese Faktoren nachteilig auf die Zeit- und Kostenökonomie auswirken.

3 Theoretische Vorbetrachtungen

Dieses Kapitel präsentiert die Charakterisierung gepulster Laserstrahlung sowie die Grundlagen der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie und dient als Basis für die Auswertung und Diskussion der durchgeführten Experimente.

3.1 Charakterisierung gepulster Laserstrahlung

Die Wechselwirkung von Laserstrahlung mit einer Materialoberfläche kann durch die eingetragene Pulsenergie Q pro Fläche, definiert als Fluenz H , und Zeit, definiert als Intensität I , beschrieben werden. Sowohl die Intensität, als auch die Fluenz sind jedoch nicht direkt messbar und werden zunächst aus der Energie des Laserstrahls und dem resultierenden zeitlichen Verlauf der Intensität sowie der räumlichen Dimensionierung des Strahlprofils heraus bestimmt. Bei der Verwendung gepulster Laserstrahlung lassen sich dabei folgende Zusammenhänge für die Pulsenergie, die Intensität und die Fluenz aufstellen [7]:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) dx dy, \quad (3.01)$$

$$H(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, t) dt \quad (3.02)$$

Durch die Variablen x und y wird ein orthogonal zur Ausbreitungsrichtung z liegende Fläche aufgespannt. Die Variable t kennzeichnet hierbei den zeitlichen Verlauf.

3.1.1 Gauß'sche Pulse - räumlichen Strahlverteilung

Werden die Koordinatenachsen der Fläche mit den Variablen x, y entlang der Ausbreitungsrichtung z gelegt, kann die räumliche Verteilung der Fluenz bei einem elliptischen Strahlprofil mit

$$H(x, y) = H_0 \cdot e^{\left(-2 \cdot \frac{x^2}{x_0^2}\right)} \cdot e^{\left(-2 \cdot \frac{y^2}{y_0^2}\right)} \quad (3.03)$$

beschrieben werden [7]. Die Variable H_0 definiert dabei die maximale Fluenz, auch Spitzenfluenz genannt. In Bezug auf eine räumliche Strahlausbreitung in Form einer Gauß'schen Funktion werden die Richtungen der Ellipsenachsen nach Gleichung (3.01) durch die Variablen x_0 und y_0 beschrieben. Demzufolge kann die Pulsenergie

$$Q = 4 \cdot H_0 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left(-2 \cdot \frac{x^2}{x_0^2}\right)} dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left(-2 \cdot \frac{y^2}{y_0^2}\right)} dy \quad (3.04)$$

unter der Berücksichtigung einer räumlichen Gauß-Verteilung der Laserstrahlung beschrieben werden.

Durch die Nutzung eines wie in [8] beschriebenen Lösungsansatzes mit

$$\int_0^{\infty} e^{(x^2 \cdot y^2)} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot y}, \quad (y > 0) \quad (3.05)$$

ergibt sich für einen gepulsten Laserstrahl mit Gaußprofil ein Zusammenhang zwischen der Pulsenergie Q und der Spitzenfluenz H_0 mit:

$$H_0 = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot x_0 \cdot y_0} \quad (3.06).$$

Bei einem rotationssymmetrischem Gaußprofil lässt sich in Anlehnung an Gleichung (3.03) die räumliche Verteilung der Fluenz durch dessen Zylinderparameter mit

$$H(r) = H_0 \cdot e^{\left(-2 \cdot \frac{r^2}{w_0^2}\right)} \quad (3.07).$$

beschrieben, wobei der radiale Abstand zur optischen Mitte von der Variablen r mit

$$H(w_0) = H_0 \cdot e^{(-2)} = \frac{H_0}{e^2} \quad (3.08).$$

bei $r = w_0$ definiert wird. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der Strahlradius w_0 eine Kenngröße ist, an dem die Spitzenfluenz H_0 auf den $\frac{1}{e^2}$ -fachen Wert reduziert wurde. Basierend auf Gleichung (3.01) unter der Kenntnis der Pulsenergie und des Strahlradius w_0 berechnet sich die Spitzenfluenz mit

$$H_0 = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot w_0^2} \quad (3.09).$$

3.1.2 Gauß'sche Pulse - zeitliche Strahlverteilung

Bei einem gepulsten Laserstrahl mit Gaußprofil lässt sich die zeitliche Intensitätsverteilung mit

$$I(t) = I_0 \cdot e^{\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{t^2}{\tau_p^2}\right)} \quad (3.10).$$

beschreiben [9]. Der Parameter I_0 stellt dabei den Wert der Maximalintensität (Spitzenintensität) dar. Die Pulsdauer τ_p wird durch die von der Halbwertsbreite (FWHM – full

width half maximum) gesetzten Grenze definiert bei der die Intensität auf die Hälfte abgesunken ist (Abbildung 1).

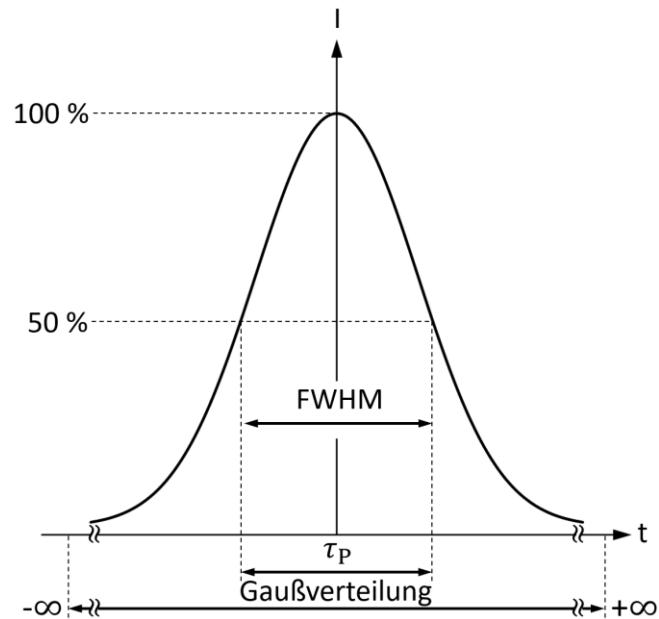


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Halbwertsbreite FWHM und Pulsdauer τ_p bei einer Intensitätsverteilung mit Gaußprofil

Der Zusammenhang ist demnach wie folgt:

$$I\left(\frac{\tau_p}{2}\right) = \frac{I_0}{2} \quad (3.11).$$

Durch den Lösungsansatz von [8]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (3.12).$$

folgt

$$H(x, y) = I_0 \cdot \int_0^{\infty} e^{\left(-4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{t^2}{\tau_p^2}\right)} dt = \sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot \frac{\tau_p}{2} \quad (3.13).$$

Daraus ergibt sich ein Zusammenhang aus der Spitzenintensität I_0 , der Pulsenergie Q und dem Strahlradius w_0 mit

$$I_0 = \frac{4 \cdot Q}{\tau_P \cdot \pi \cdot w_0^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}}} \quad (3.14).$$

Der Formfaktor einer Verteilung nach Gauß wird in dieser Gleichung durch den Wurzelterm dargestellt. Mit

$$Q = P_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\ln(2)}} \cdot \tau_P = P_0 \cdot 1,0645 \cdot \tau_P \approx P_0 \cdot \tau_P \quad (3.15)$$

und unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen der messbaren mittleren Laserleistung P_{av} und der maximalen Laserleistung P_0

$$P_0 = \frac{P_{av}}{1,0645 \cdot \tau_P \cdot f} \quad (3.16)$$

kann der Zusammenhang zwischen der Spitzenfluenz H_0 , der Spitzenintensität I_0 und der Pulsdauer τ_P durch

$$I_0 = \frac{H_0}{1064 \cdot \tau_P} \quad (3.17)$$

beschrieben werden.

3.1.3 Einkopplung elektromagnetischen Energie in Material

Energiebilanz

Bei der Wechselwirkung gepulster Laserstrahlung mit einer Spitzenintensität I_0 und Materialoberfläche, kann ein Teil der Strahlung reflektiert, absorbiert oder transmittiert werden. Schlussfolgernd können Strahlanteile bestehend aus der reflektierten Intensität I_R , der absorbierten Intensität I_A und der transmittierten Intensität I_T entstehen (Abbildung 2).

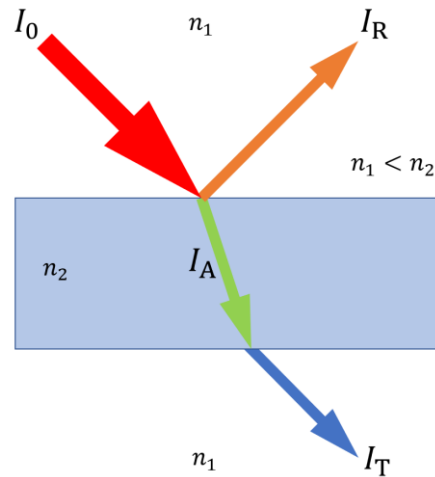


Abbildung 2: Schematische Darstellung der einfallenden Spitzenintensität I_0 rot, der reflektierte Intensitätsanteil I_R orange, der absorbierte Intensitätsanteil I_A grün und der transmittierte Intensitätsanteil I_T dunkelblau dargestellt. Der elektromagnetische Strahl fällt dabei aus einem optisch dünnen Medium n_1 auf ein optisch dichtes Medium n_2 ein.

Dieser Zusammenhang lässt sich wie folgt im Energieerhaltungssatz angeben:

$$I_0 = I_R + I_A + I_T \quad (3.18).$$

Normiert auf die Spitzenintensität I_0 ergibt sich der Zusammenhang:

$$1 = \frac{I_0}{I_0} = \frac{I_R}{I_0} + \frac{I_A}{I_0} + \frac{I_T}{I_0} \quad (3.19).$$

Aus dieser Relation können das Maß des reflektierten, absorbierten und transmittierten Anteils mit

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (3.20), \quad A = \frac{I_A}{I_0} \quad (3.21), \quad T = \frac{I_T}{I_0} \quad (3.22).$$

Hergeleitet werden und demzufolge durch

$$1 = R + A + T \quad (3.23).$$

der Reflexionsgrad R , der Absorptionsgrad A und der Transmissionsgrad T definiert werden. Die Wichtung der jeweiligen Grade ist von materialspezifischen Kenngrößen, topologischen Eigenschaften der Materialoberfläche sowie der Wellenlänge, dem Einfallswinkel und der Polarisation der eingesetzten Laserstrahlquelle abhängig [7].

Absorption von Laserstrahlung im Material

Bei der Wechselwirkung von Laserstrahlung an der Materialoberfläche wird ein Teil der Strahlung reflektiert sodass nur der Teil von $(1 - R) \cdot I_0$ in das Material deponiert wird. Die Abnahme der absorbierten Intensität bzw. der Intensitätsverlauf in die Tiefe z des Materials kann mit dem Gesetz von Lambert-Beer

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} = -\alpha_k \cdot I^k(z) \quad (3.24)$$

beschrieben werden [7]. Dabei stellt die Kenngröße α den Absorptionskoeffizienten dar und beschreibt die Abschwächung bzw. Dämpfung der Laserstrahlung im Material. Durch Integration von Gleichung (3.24) und der Annahme einer linearen Absorption mit ($k = 1$), wird anhand Gleichung (3.25) deutlich, dass die Intensität der Laserstrahlung in Abhängigkeit von der Materialtiefe mit

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (3.25)$$

einer exponentiellen Dämpfung unterliegt. Wie in Abbildung 3 dargestellt, nimmt die Intensität $I = (1 - R) \cdot I_0$ beim Einkoppeln in ein Material der Dicke z exponentiell ab, bis bei einer Tiefe dz die Laserstrahlung vom Material komplett absorbiert wird.

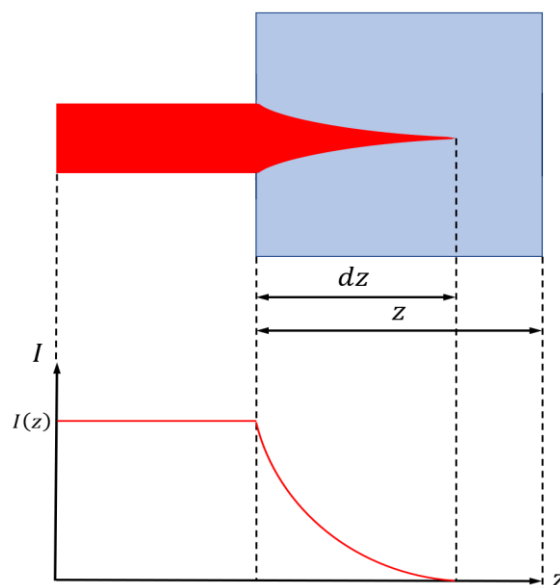


Abbildung 3: Darstellung des Intensitätsverlaufs beim Auftreffen von Laserstrahlung (rot) auf eine Grenzfläche und die exponentielle Dämpfung der Intensität ins Materialinnere.

Eine weitere Kenngröße zur Beschreibung der Dämpfung von Laserstrahlung im Material ist die optische Eindringtiefe δ , die mit

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (3.26)$$

Das Reziprok zum Absorptionskoeffizienten und die Strecke repräsentiert, an der die Spitzenintensität auf das $\frac{1}{e}$ -fache abgefallen ist [10]. Schlussfolgernd ist die optische Eindringtiefe eine wichtige Kenngröße für das Maß des transmittierten Anteils der Laserstrahlung. Sobald die Materialdicke z wesentlich größer als die optische Eindringtiefe δ ist, findet eine vollständige Absorption der Laserstrahlung im Material statt. Der Transmissionsanteil kann schlussfolgernd für Metalle vernachlässigt werden, da bei diesen die optische Eindringtiefe δ nur wenige Nanometern groß ist [7].

Da die optische Eindringtiefe und somit der Absorptionskoeffizient im direkten Zusammenhang zur Wellenlänge λ stehen, kann eine Berechnung mit

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{\delta(\lambda)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa(\lambda)}{\lambda} \quad (3.27)$$

erfolgen, sodass ein funktioneller Zusammenhang zwischen dem Extinktionskoeffizient κ und der Wellenlänge λ der elektromagnetischen Strahlung besteht [11].

3.2 Ablationsschwelle

Allgemein ist der Materialabtrag bei Metallen durch gepulste Laserstrahlung ein thermischer bis thermo-mechanischer Prozess, bei dem die Materialoberfläche in Abhängigkeit von der Pulsdauer unterschiedlich schnell erhitzt wird [7]. Beim Materialabtrag mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich wird das Material größtenteils durch Verdampfung bzw. Sublimation abgetragen [7]. Durch die Verwendung ultrakurzer Pulse, d.h. Pulsdauern im Pikosekundenbereich und kürzer, wird die Materialoberfläche extrem schnell erhitzt, sodass anstatt einer klassischen Verdampfung das Material vorrangig durch Phasenexplosion (thermische Komponente) kombiniert mit Stoßwellen (mechanische Komponente), die sogenannte Ablation, abgetragen wird [12]. Des Weiteren ist die Ablation durch eine Bildung eines Plasmas charakterisiert [13].

Um eine Ablation mit ultrakurzen Pulsen realisieren zu können, muss die Energiedichte bzw. die Fluenz eine materialspezifische Schwelle, auch Ablationsschwelle H_{th} genannt, überwinden. Bei Metallen kann diese Ablationsschwelle mit

$$H_{\text{th}} = \frac{\Delta H_s \cdot \rho}{\alpha(\lambda) \cdot A \cdot M} \quad (3.42),$$

berechnet werden [14]. Demzufolge ist die Ablationsschwelle von materialspezifischen Kenngrößen wie der Sublimationsenthalpie ΔH_s , der Materialdichte ρ , der Molmasse M sowie dem Absorptionsgrad A und dem Absorptionskoeffizienten α abhängig.

3.3 Inkubation

Unabhängig von der materialspezifischen Ablationsschwelle kann ein Laserpuls die topologischen oder chemischen Eigenschaften der Materialoberfläche ändern, sodass eine Veränderung des Absorptionsgrades für einen nachfolgenden Puls entstehen kann (Abbildung 4).

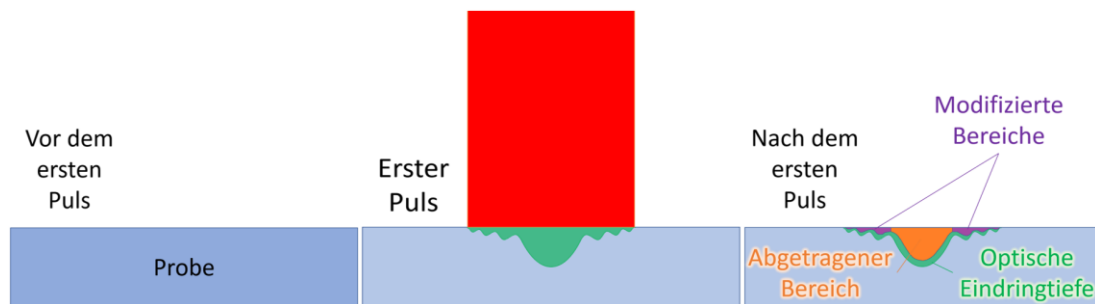


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Inkubationseffektes

Schlussfolgernd kann bei einer Mehrfachbestrahlung die Ablationsschwelle von der im Einzelpuls abweichen bzw. vermindert werden. Der funktionale Zusammenhang zwischen der Bestrahlung einer lokalen Fläche mit einer Pulsanzahl N und der Multipuls-Schwellfluenz $H_{\text{th}}(N)$ kann durch

$$H_{\text{th}}(N) = H_{\text{th}}(N = 1) \cdot N^{(S-1)} \quad (3.43)$$

mittels einer Potenzfunktion beschrieben werden [15]. Der Inkubationsfaktor S bestimmt den Einfluss des Inkubationseffektes auf die resultierende Ablationsschwelle. Demzufolge nimmt die Ablationsschwelle bei einer Multipuls-Bestrahlung durch einen kleinen Inkubationsfaktor am stärksten ab.

Bei einer Untersuchung mit einer Laseranlage mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich konnte für eine Edelstahlprobe (1.4404) durch die Verwendung des Multipulsmodus eine Senkung der Ablationsschwelle gegenüber des Einzelpulsmodus von $0,444 \text{ J/cm}^2$ ($N=1$) auf $0,201 \text{ J/cm}^2$ ($N=100$) ermittelt werden. Der Inkubationsfaktor der Edelstahlprobe wurde bei einer Pulswiederholfrequenz $146,3 \text{ KHz}$ mit einem Wert von $0,8209$ angegeben. Die Pulsdauer der Laseranlage hatte einen Wert von 170 fs . [16].

3.4 Ablation von Metall mit ultrakurzen Einzel- und Doppelpulsen

Bei der Ablation von Metallen mit ultrakurzen Einzel- und Doppelpulsen kommt es zu einer Wechselwirkung von Laserpulsen mit extrem kurzen Zeitintervallen im Femto- oder auch Pikosekundenbereich mit einem Festkörpermateriale. Durch die Definition, dass Leistung die wirkende Energie pro Zeiteinheit darstellt, kann geschlussfolgert werden, dass mit einer Verringerung des Zeitintervalls eine proportionale Steigerung der Leistung einhergeht. Folglich ist die auf eine Bearbeitungsfläche des metallischen Festkörpermateriale hervorgerufene Gesamtleistung entsprechend sehr hoch.

Ultrakurzer Einzelpulsmodus

Die Pulse, die im ultrakurzen Einzelpulsmodus auf die Festkörperoberfläche propagieren werden, besitzen die gesamte Pulsenergie, die durch die genutzte mittlere Laserleistung bereitgestellt wird. In Abhängigkeit zur materialspezifischen Ablationsschwelle können hierbei drei verschiedene Regime beobachtet werden. Wie in Abbildung 5 dargestellt, stellt das Aufschmelzen das erste Regime dar, bei dem ausreichend Energie in das Material eingekoppelt wurde um den materialspezifischen Schmelzpunkt zu überschreiten. In Anlehnung an die Multipulsablationsschwelle aus Kapitel 3.3 ist in diesem Regime bei der Bearbeitung von Edelstahl die Fluenz pro Puls kleiner als $0,1 \text{ J/cm}^2$. Ein Abtrag von Material wird noch nicht erreicht, da die absorbierte Fluenz unter der Schwelle für eine Ablation liegt. Eine zweite Phase kann mit der Überschreitung der Ablationsschwelle erreicht werden. Charakteristisch für den hierbei hervorgerufenen Ablationsvorgang ist der durch eine Stoßwelle erzeugte Oberflächenaufbruch und der von einer Verdünnungswelle (rarefaction wave) verursachte Materialaustrag (Abbildung 5). Die Verdünnungswelle wird allerdings erst mit einer Vergrößerung der zeitlichen Pulsabstände in einen Bereich von 10 ps bis wenigen 100 ps hervorgerufen [17,18]. Für eine erfolgreiche Ablation muss jedoch die wirkende Kraft der Verdünnungswelle in der korrespondierenden Materialschicht ausreichend hoch sein. Das dritte Regime, die Phasenexplosion (phase explosion), wird bei Fluenzen deutlich über der materialspezifischen

Ablationsschwelle hervorgerufen. Dabei wird bei einem nahezu isochoren Aufheizen innerhalb wenigen Pikosekunden die thermodynamisch kritische Temperatur erreicht, wo der Phasenübergang Flüssig-Gas ohne Volumenänderung erreicht wird [19] (Abbildung 5).

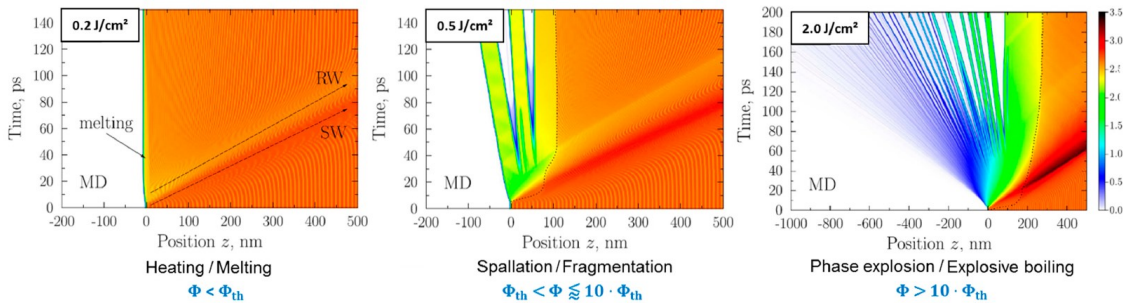


Abbildung 5: Darstellung der Ergebnisse einer Simulation der Molekulardynamik bei der Verwendung eines Laserstrahls im Einzelpulsmodus mit Propagation auf Aluminium. Die räumlichen Koordinaten sind beginnend mit $z = 0$ nm (der Materialoberfläche) an der Abszisse angetragen. An der Ordinate befindet sich die Laufzeit der Simulation mit dem Maximum des Laserpulses bei 5 ns. Die Farben des Temperaturfeldes entsprechen gleichzeitig der Dichte des Aluminium-Materials in g/cm^3 und werden im aufrechten Balken rechts dargestellt. Die Bereiche ohne Einwirkung werden weiß hervorgehoben. Mit einem Ansteigen der Fluenz, betrachtet von der Oberfläche in Richtung des Bodens, erreicht das Material verschiedene Regime. Diese reichen vom Aufschmelzen (Heating/Melting) der Materialoberfläche, bei der es zu keiner Ablation kommt, bis zur Phasenexplosion, bei der es zu einem Austrag durch eine sehr stark ausgeprägte Verdampfung und Ionisation des Materials kommt. Im Aufbruchs-Regime (Spallation) (mittlere Darstellung) kommt es zu einer Ablation, für die ein Aufbrechen der Materialoberfläche charakteristisch ist. Dieses Phänomen führt in der Folge zu sehr hohen Oberflächenqualität mit geringen mittleren Oberflächenrauheitswerten und gut definierbaren Abtragstiefen während der Laserbearbeitung. Die hervorgerufene Stoßwelle wird dabei mit SW und die Verdünnungswelle mit RW abgekürzt und dargestellt [19].

Ein optimaler Volumenabtrag lässt sich im Regime des Aufbrechens (Spallations-Regime) erreichen, da hierbei die eingekoppelte Energie vorrangig zur Materialablation beiträgt. Werden geringere Fluenzen genutzt, so dient die verwendete Energie vornehmlich dem Aufschmelzen bzw. Erhitzen der Materialoberfläche. Bei höheren Fluenzen im Regime der Phasenexplosion wird hingegen der Großteil für die Ionisierung aufgewandt [20]. Die Einkopplung von Fluenzen außerhalb des Spallations-Regimes führen entsprechend zu geringeren Abtragsvolumen (Abbildung 6).

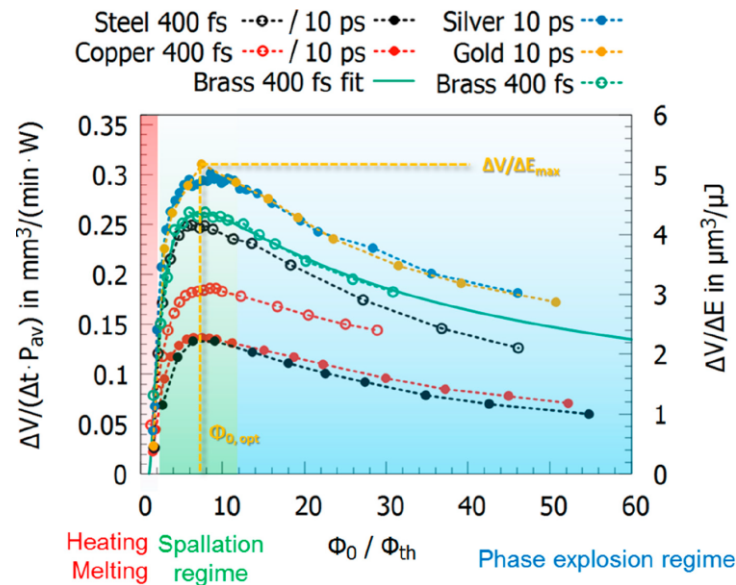


Abbildung 6: Darstellung der Abtragsvolumen in Abhängigkeit zur eingekoppelten Energie bei Nutzung des Einzelpulsmodus mit einer Wellenlänge im nahen Infrarotbereich für verschiedene Metalle. Für die an der Abszisse angetragene Fluenz wurde eine Normalisierung vorgenommen, da verschiedene Metalle unterschiedliche Schwellfluenzen aufweisen [19].

Treffen die Pulse im ultrakurzen Einzelpulsmodus mit Zeitabständen von wenigen Nanosekunden auf dieselbe Bearbeitungsstelle, wird der mit dem ersten Puls induzierten Restwärme deutlich weniger Zeit gegeben um in das Material abgeleitet zu werden. Der nachfolgende Puls kann die hierbei in die Wechselwirkungszone deponierte Energie nutzen, sodass sich die gesamte eingekoppelte Energie lokal erhöht.

Dadurch kann mehr Material ablatiert werden und die resultierende Restwärme wird durch eine (Wärme-)Akkumulation dieser erhöht (Abbildung 7).

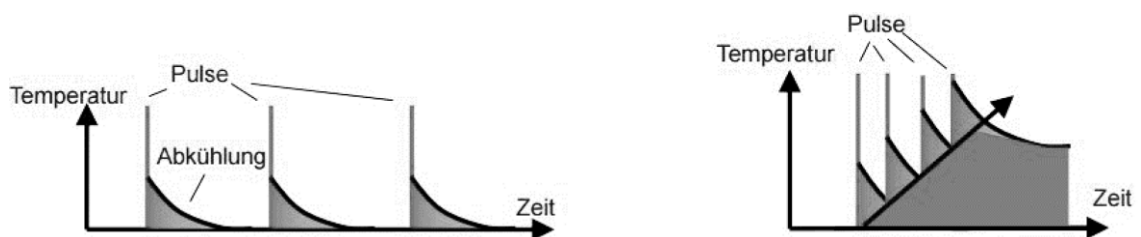


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Wärmeakkumulation bei der Verwendung von mehr als zwei Pulsen (links ohne, rechts mit Wärmeakkumulation) [21].

Je nach genutztem zeitlichem Pulsabstand, Metall und Fluenz kann ein Folgepuls auf 10% bis 50% eingekoppelter Energie des vorangegangenen Pulses treffen [19,22–31]. Die Wärmebeeinflusste Zone (WZB) besitzt eine entsprechend geringere Ausprägung als bei konventionell gepulster Laserstrahlung [32]. (Abbildung 8).

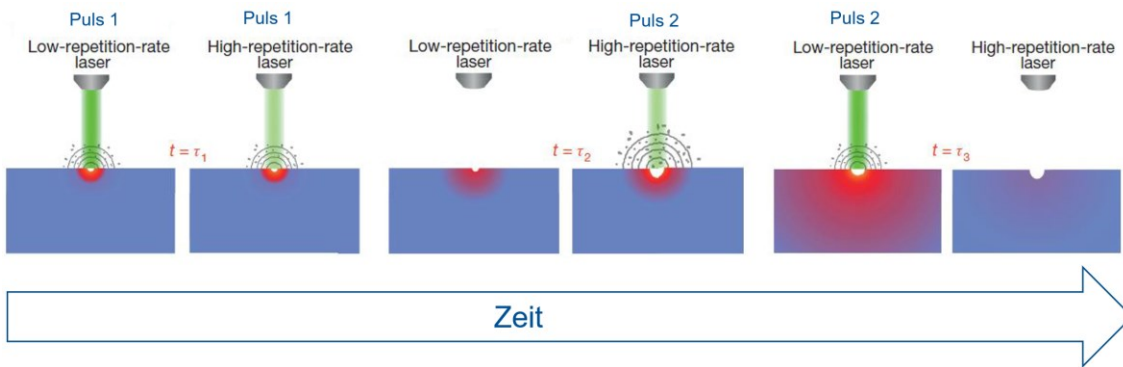


Abbildung 8: Skizzenhafte Darstellung der Ablation mittels konventioneller gepulster Laserstrahlung (Low-repetition-rate laser) und ultrakurzgepulster Laserstrahlung (High-repetition-rate laser) [33]

Durch eine Modifikation der Oberfläche, wie Ripple-Strukturen die durch einen vorangegangenen Laserpulse erzeugt wurden, oder durch die Verwendung noch höherer Puls wiederholraten kann der Effekt der Wärmeakkumulation weiter gesteigert werden [25,34]. Eine Erhöhung der auf die Materialoberfläche wirkende Fluenz zur Steigerung des Abtragsvolumens hat sich jedoch für die dabei entstehende Oberflächenbeschaffenheit als nachteilig erwiesen, da hierbei gleichzeitig auch die Intensität der Verdünnungswelle zunimmt und die Oberflächenrauheitswerte zunehmen. Gleichsam nimmt das Abtragsvolumen pro Zeit und Energie immer weiter ab. Die Folgen daraus sind eine verringerte Abtragsproduktivität und -effizienz [23,35,36].

Ultrakurzer Doppelpulsmodus

Im Gegensatz zum Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen wird beim Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen eine Verteilung der Energie auf zwei Pulse vorgenommen und man spricht von einem sogenannten Burst (einer Pulsgruppe). Die Frequenz der aufeinander folgenden Pulse innerhalb eine Pulsvorganges liegt hierbei im hohen MHz- bis GHz Bereich. Analog zur Pulswiederfrequenz f_p unter der Laserpulse im Einzelpulsmodus auf eine Festkörperoberfläche eingestrahlt werden, spricht man bei der Verwendung von Bursts von einer Burstwiderholffrequenz f_{Burst} .

Die Frequenz mit der die Pulse innerhalb eines Bursts dabei aufeinanderfolgen wird als Intra-Burstfrequenz f_{Puls} bezeichnet (Abbildung 9) [19].

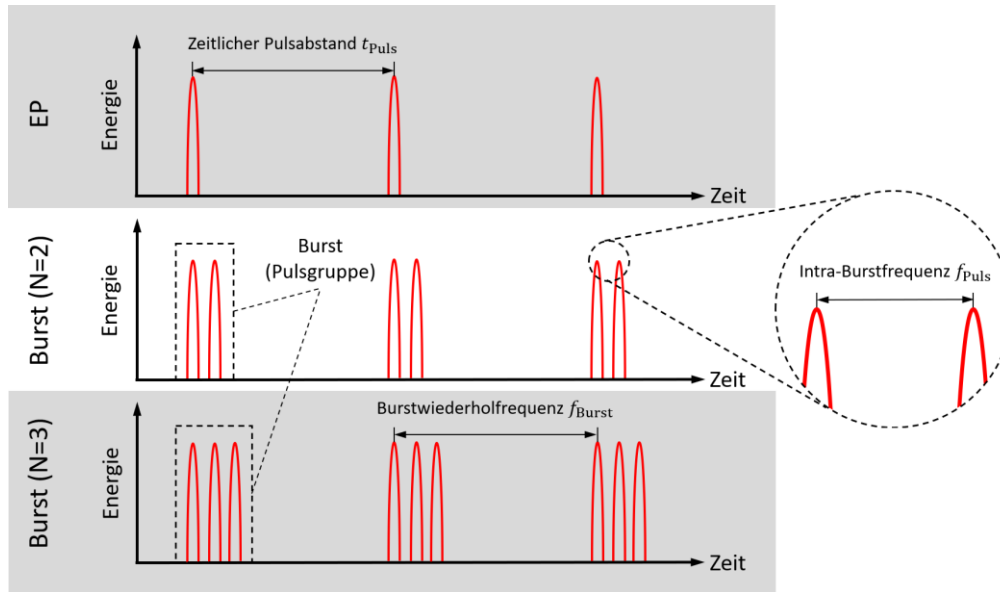


Abbildung 9: Skizzenhafte Darstellung der zeitlichen Pulsabstände des Einzelpulsmodus (EP) (oben) und Burst-Modus mit zwei (Mitte) und drei Pulsen pro Burst (unten).

Zur Ablation von Metall mit ultrakurzen Doppelpulsen wurden schon umfassende Untersuchungen und Studien unternommen. Im Folgenden soll daher eine entsprechende Zusammenfassung der dabei entstandenen Ergebnisse geschehen.

Werden bei der Nutzung von ultrakurzen Doppelpulsen zeitliche Intra-Burstabstände im Bereich der Elektronen-Phonon-Kopplung verwendet, so ist das Abtragsvolumen vergleichbar mit dem abgetragenen Volumen im Einzelpulsmodus mit doppelter Pulsenergie [19]. Die Intensitäten der dabei erzeugten Schock- und Verdünnungswellen sind folglich hoch und führen zu einer Materialablation. Mit einer Verringerung der Intra-Burstfrequenz und der damit einhergehenden Vergrößerung des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb des Bursts (zeitlicher Intra-Burstabstand) kann jedoch die hervorgerufene Schockwelle gemindert werden [17,19]. Hintergrund bildet die destruktive Interferenz der beiden aufeinanderfolgenden laserinduzierten Stoßwellen. Die hierbei geminderte Stoßwellen-Intensität führt zu einer Minderung der Verdünnungswellen-Intensität und entsprechend zu einem geringeren Abtragsvolumen. Wird der zeitliche Intra-Burstabstand weiter erhöht (bspw. wie in der Simulation in Abbildung 5 auf 50 ps), so kommt es zu einer Interaktion des zweiten Pulses im Burst mit schon herausgelösten Teilchen der Metalloberfläche, der sogenannten Ablationswolke [17,37]. Ein solcher Effekt wird als Shielding (Abschirmung) bezeichnet und wirkt der Weiterverwendung eingekoppelter Energie negativ entgegen. Die Ablationswolke expandiert nach dem ersten Puls im Burst von der Wechselwirkungszone weg. Durch das hierdurch hervorgerufene Aufheizen und

auch durch das teilweise Verdampfen der Teilchen kommt es beim Einfall des zweiten Pulses zu einem extremen Temperaturanstieg und der Erzeugung eines Plasmas [17,18,37–41]. Durch die zeitlich sehr kurz aufeinanderfolgenden Pulse bei einer hohen Intra-Burstfrequenz besitzen die ablatierten Teilchen weniger Zeit sich von der Bearbeitungsstelle zu entfernen. Je kürzer die zeitlichen Pulsabstände sind, desto dichter ist die entsprechende Ablationswolke auf die der zweite Puls dabei trifft [42]. Die Teilchendichte der Ablationswolke kann dabei an der Bearbeitungsstelle so hoch sein, dass diese einen festkörperähnlichem Charakter besitzt und der Folgepulse dabei teilweise bis nahezu vollständig abgeschirmt wird. Ebenso bewirkt eine höhere Energie-Einkopplung das Ablatieren von mehr Materialteilchen wodurch die Teilchendichte der Ablationswolke ebenso erhöht wird [39,43,44]. Eine Erhöhung der Fluenz kann auch zu einer stärkeren Wiederablagerung von bereits ablatierten Teilchen führen. Dies hat zur Folge, dass das Abtragsvolumen im Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen geringer ausfällt, als der Materialabtrag im vergleichbaren Einzelpulsmodus. Dieses Phänomen wird als sogenanntes valley-of-death bezeichnet und ist abhängig vom Material und der Fluenz [39,45–52]. Für Stahl hat sich gezeigt, dass mit zeitlichen Burstabständen in einen Bereich von mehreren zehn Nanosekunden der Einfluss der Ablationswolke und der Wiederablagerung von bereits ablatierten Teilchen abnimmt. Mit Erreichen von Burstabständen mit mehr als $10\ \mu\text{s}$ wird der Einfluss der auftretenden Effekte der genannten Interaktionen mit dem zweiten Puls vernachlässigbar [53] (Abbildung 10).

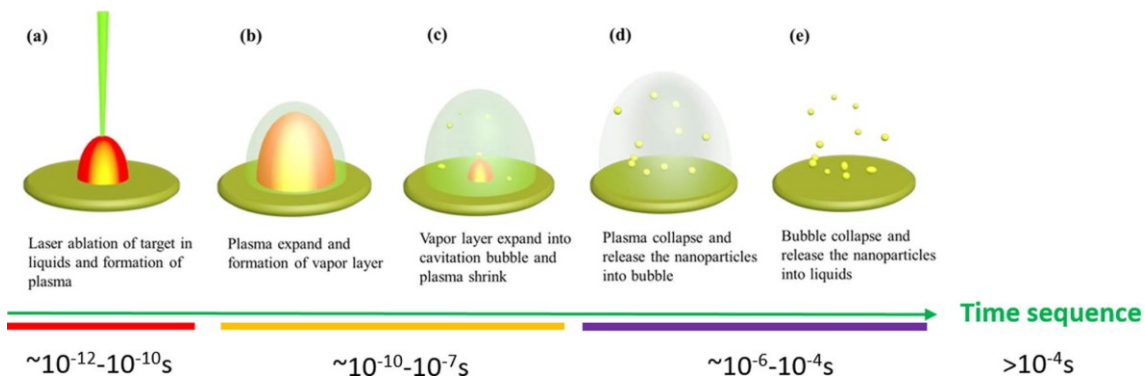


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Ablationsprozesses in Abhängigkeit von der Zeit [54].

Im Kapitel 5 - „Ergebnisse und Diskussion“ wird der Doppelpuls als Burst (N=2) bezeichnet.

3.5 Ablation von Metall mit Multipulsen

Die Ablation von Metall mit Multipulsen erfolgt analog zur Ablation mit Doppelpulsen unter Verwendung von mehr als zwei Pulsen innerhalb eines Bursts (Abbildung 9). Auch zu diesem Thema wurden bereits intensive Untersuchungen unternommen, wodurch sich gleichsam eine Zusammenfassung der bisher gefundenen Ergebnisse anbietet.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Anzahl der Pulse im Burst einen entscheidenden Einfluss auf das erreichbare Abtragsvolumen mit Multipulsen nimmt [19]. Für die Materialien Aluminium, Kupfer und Bronze konnten mit einer ungeraden Anzahl an Pulsen im Burst höhere Abtragsvolumen, als mit geraden Pulsanzahlen erreicht werden [55–58]. Die Erklärung für diesen dabei mit steigender Pulsanzahl oszillierenden Effekt kann mit der durch den ersten Puls hervorgerufenen Ablationswolke erfolgen. Wie bei der Beschreibung der Ablation von Metallen mit ultrakurzen Pulsen im Doppelpulsmodus wird dabei der zweite Puls entweder teilweise oder sogar vollständig abgeschirmt und eine Abschirmung tritt ein. Durch die Interaktion des zweiten Pulses mit der Ablationswolke kommt es jedoch zu einer Ausdünnung hinsichtlich der Ablationswolkendichte. Die Energie eines darauffolgenden dritten Pulses wird so optimaler in die Bearbeitungsstelle eingekoppelt und nicht von den Teilchen der Ablationswolke absorbiert. In Abbildung 11 wird dieser Vorgang anhand von Schattenfotografien visualisiert, sodass die vom ersten Puls erzeugte Ablationswolke den zweiten Puls abschirmt, dieser durch die Wechselwirkung mit der Ablationswolke Teilchen redeponiert und schlussfolgernd der dritte Puls die Materialoberfläche nahezu ungehindert bestrahlen kann [37]. Dieser Vorgang iteriert in der Folge, sodass ebenso von einem dritten Puls ein Ablationswolke erzeugt wird und ein nachfolgender vierter Puls abgeschirmt wird [19,39].

In einer anderen Studie konnten erste Zusammenhänge zwischen der Fluenz pro Puls, der Pulsdauer und der Anzahl an Pulsen hinsichtlich der entstehenden Oberflächenqualität eruiert werden [19]. In Abhängigkeit zu den gewählten Pulsdauern und der in die Materialoberfläche eingekoppelten Spitzenfluenz kann durch Akkumulation der Wärme ein Schmelzfilm erzeugt werden, der zu einer Glättung der durch Spallation aufgerauten Oberfläche führt (Abbildung 12) [60–62].

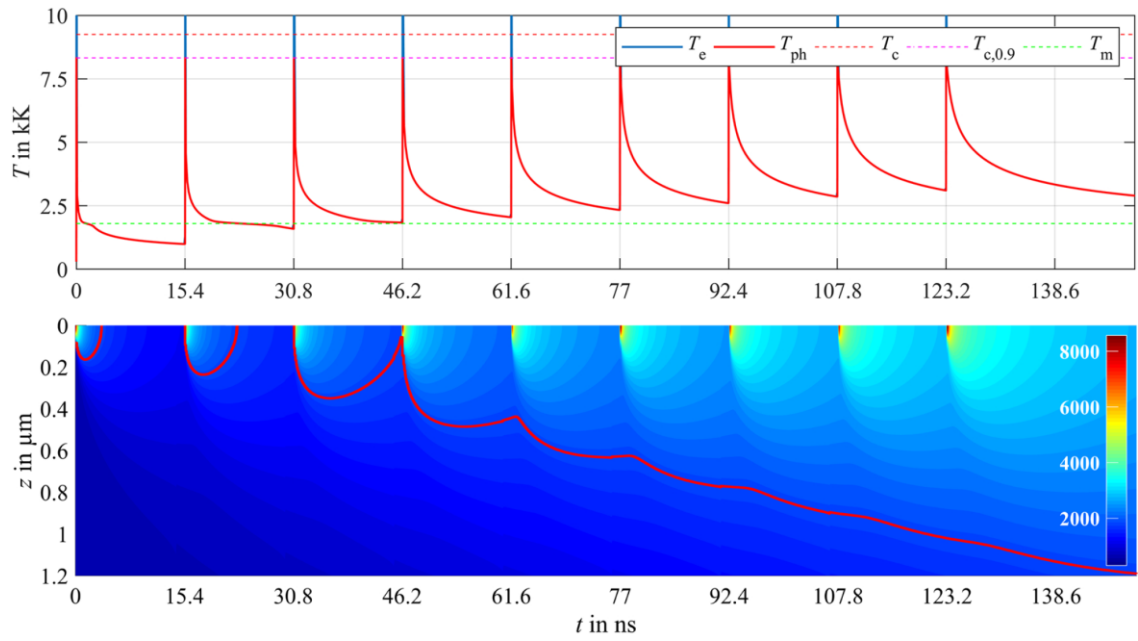


Abbildung 12: Darstellung der Ergebnisse einer Simulation für eine Spitzenfluenz H_0 von $1,5 \text{ J/cm}^2$ für einen zeitlichen Pulsabstand τ_p von 10 ps . Oberes Diagramm: Die Temperaturentwicklung des Elektronen-System T_e und Phononen-System T_{ph} in Abhängigkeit der Zeit t . Unteres Diagramm: Die Wärmeverteilung des Phononen-Systems in Abhängigkeit der Zeit. Die schmelzflüssige Phase wird mit einer roten Linie hervorgehoben [61].

Durch die Verwendung von Bursts können die Werte der mittleren Oberflächenrauheit entsprechend geringgehalten werden.

Die genannten auftretenden Effekte und Phänomene bei der Ablation von Metallen mit ultrakurzen Einzel- und Doppelpulsen sind jedoch Gegenstand der gegenwärtig durchgeführten Forschung und zählen daher als noch nicht abschließend geklärt.

4 Experimentelle Details

In diesem Abschnitt werden die Laserstrahlquelle, die Strahlführung, das Probenmaterial, der verwendete Parameterbereich sowie Mess- und Analysemethoden präsentiert.

4.1 Laserstrahlquelle und -führung

Für die Umsetzung der in dieser Arbeit geplanten Versuche wurde eine Laserstrahlquelle des Herstellers Time-Bandwidth®-Products verwendet. Der Pikosekundenlaser Fuego™ kann durch eine passive Modenkopplung mittels sättigbarer Halbleiter, der SESAM®-Technologie (semi conductor saturable absorber mirror), hochenergetische Pulse mit einer Pulsdauer von 10 ps erzeugen.

Der Fuego™ besitzt eine maximale mittlere Leistung von 40 W und eine emittierende Grundwellenlänge von 1064 nm, die bei den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit auch genutzt wurde. Mittels dielektrischer Spiegel wird die Laserstrahlung durch einen Strahlaufler (Jenoptik) zu einem Scanner (Aerotech Inc.) geführt, sodass durch die Verwendung einer f-Theta Optik (Sill Optics) der Laserstrahl auf der Probenoberfläche mit einem Strahldurchmesser w_0 mit 15 μm fokussiert abgelenkt wird (Abbildung 13).

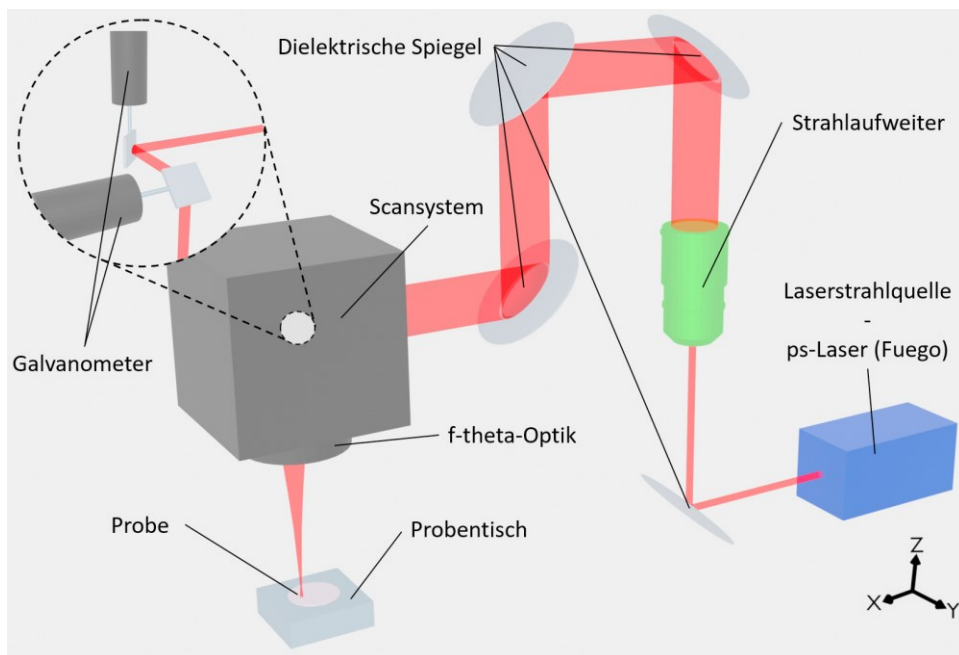


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Strahlführung

Wie in Abbildung 14 dargestellt, wurde der Strahldurchmesser mittels eines Strahlprofilmessgerätes, Primes MSM, gemäß DIN EN ISO 11146 ermittelt. Des Weiteren wird

anhand der Energieverteilung, die in Abbildung 14 links dargestellt wird, deutlich, dass das Strahlprofil im Fokus eine leicht elliptische Energieverteilung besitzt.

Presentation: 86%

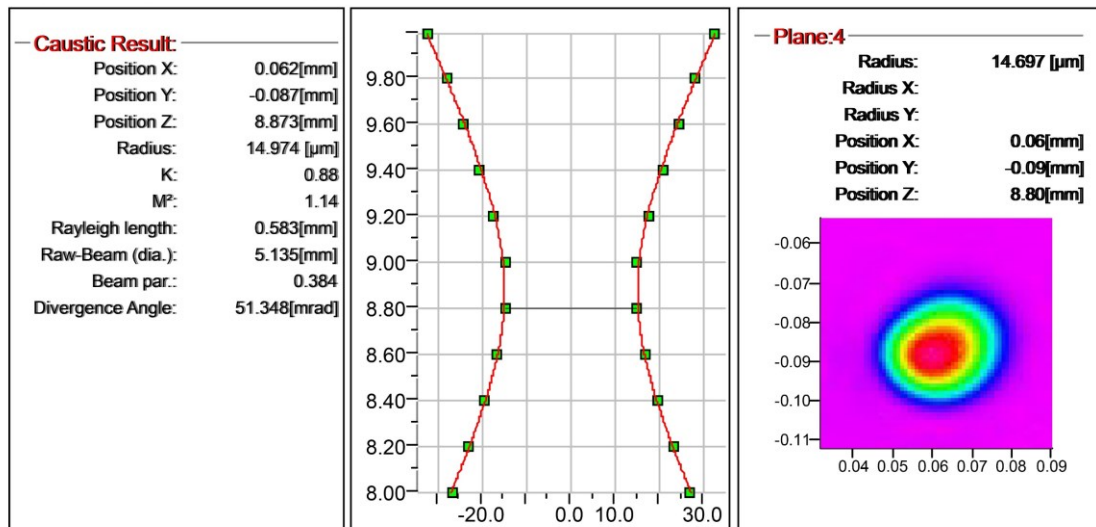


Abbildung 14: Exemplarische Darstellung der Vermessung des Strahlprofils mit dem Primes MicroSpotMonitor

4.2 Probenmaterial

Edelstahl

Die Zusammensetzung eines Edelstahlwerkstoffs besteht nach EN 10020 im Allgemeinen aus einem legierten oder unlegierten Stahl mit einem Eisenbegleiteranteil (bspw. Phosphor und Schwefel) von unter 0,025 % des Gesamtmassenanteils. Durch das Legieren mit dem Element Chrom wird der Edelstahl zum bekannten korrosionsbeständig (rostfreien) Edelstahl und bildet bei ausreichendem Chrom-Anteil eine natürliche Passivierung aus. Bedingt durch den ferromagnetischen Gefügepartner Eisen besitzt Edelstahl im Vergleich zu nicht-magnetischen Nichteisenwerkstoffen ebenso magnetische Eigenschaften. Für die Herstellung von Edelstählen werden in einer Primärstufe die konventionellen Prozesse der Stahlerzeugung (z.B. Technische Gewinnung von Roheisen, Frischen von Begleitelementen etc.) eingesetzt und in einer Sekundärstufe wird der hergestellte Stahl mit sogenannten Stahlveredlern (z.B. Chrom, Wolfram und Vanadium) legiert [63]. Ein typischer Vertreter eines solchen Edelstahls stellt der in dieser Arbeit als Probe verwendete martensitische Chromstahl dar. Der Stahl liegt dabei in einer Legierung mit dem Element Chrom vor. Martensite (metastabile Härtingsgefüge, die beim Härten von Metallen und Nichtmetallen entstehen) drehen sich durch ein

tetragonales verzerrtes kubisches Gitter mit darin eingelagerten verspannten Kohlenstoff-Atomen auszeichnen, weisen eine sehr hohe mechanische Härte und Festigkeit auf, sie sind jedoch sehr spröde. Für die gezielte Erreichung bestimmter Eigenschaften Edelstahlwerkstoffs kann auf eine Vielzahl von Legierungspartnern zurückgegriffen werden. Die Elemente Chrom und Nickel werden am häufigsten eingesetzt, da hierbei eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit und Schweißbarkeit hervorgerufen wird. Durch die Variation der Gefügepartner im Gesamtanteil kann entsprechend die Biegebruchfestigkeit und Druckfestigkeit verändert werden. Eine vermehrte Zugabe von Chrom beeinflusst beispielsweise die Korrosionsbeständigkeit positiv, mindert aber die Schweißbarkeit und die elektrische und Wärme-Leitfähigkeit. Der Anteil an Chrom im Gefüge liegt daher regulär bei Werten von über 10,5 %. Durch die Verwendung von anderen oder aber auch weiteren Legierungselementen können die Eigenschaften des Edelstahls noch gezielter angepasst werden [2].

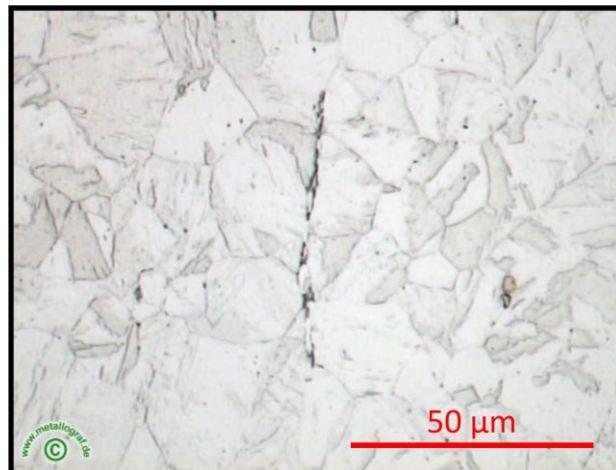


Abbildung 15: Lichtmikroskop-Aufnahme eines martensitischen Chromstahls [63]

Martensitischer Chromstahl besitzt eine Zugfestigkeit von 635 MPa bis 980 MPa und einer erreichbaren Brinellhärte von 192 HB bis zu 309 HB in Abhängigkeit zur Gefügezusammensetzung [1,64].

Probendetails

In dieser Arbeit wurde Edelstahl der Firma Böhler mit der Bezeichnung M 390 und einer Probendicke von ca. 7 mm verwendet. Weitere materialspezifische Angaben sind in den Anlagen einsehbar. Um Fehlmessungen durch zu raue Oberflächen zu vermeiden, wurden die Proben poliert und vor jedem Experiment mit Ethanol gereinigt.

4.3 Untersucher Parameterbereich

Zur Bestimmung der Volumenabträge wurden im Einzelpulsmodus und Burst-Modus Flächenabträge erzeugt. Für den Einzelpulsmodus wurden die Fluenzen im Bereich von $0,75 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bis $8,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ variiert (Abbildung 16).

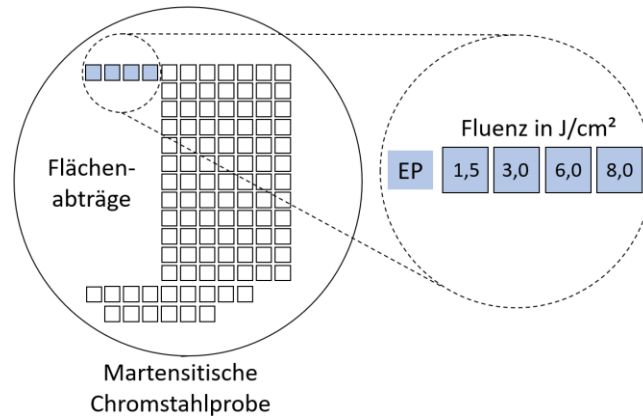


Abbildung 16: Schematische Darstellung der durch den Einzelpulsmodus (EP) erzeugten Flächenabträge unter Variation der Fluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ bis $8,0 \text{ J/cm}^2$

Im Burst-Modus wurde mit einer Pulsenanzahl im Bereich von zwei bis vier Pulsen innerhalb eines Bursts gearbeitet und die energetische Verteilung pro Puls variiert. Die Anpassung zur energetischen Verteilung pro Puls erfolgte unter Nutzung eines an einen Leistungsmesskopf angeschlossenen Oszilloskops auf den mit dem Laserstrahl eingestrahlt wurde. Die Energieverteilung wurde dabei in den drei Verteilungsarten „Gleichmäßig“, „Ansteigend“ und „Absteigend“ vorgenommen. Bei der gleichmäßigen Energieverteilung wurde die gesamte Energie innerhalb eines Bursts auf jeden Puls äquivalent aufgeteilt (Abbildung 17).

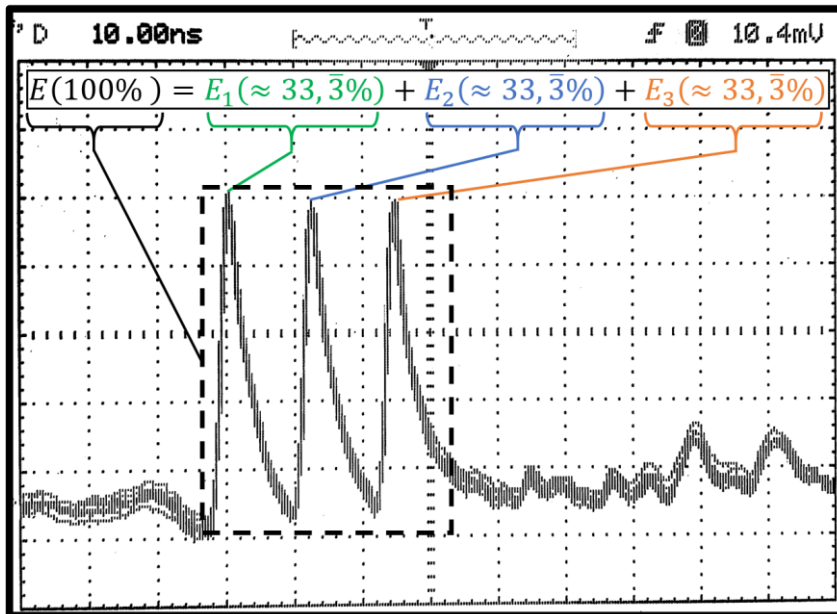


Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung der gleichmäßigen Energieverteilung pro Puls im Burst-Modus mit drei Pulsen pro Burst.

Für die aufsteigende Verteilung der Energie erfolgte eine Anpassung, bei der jeder Folgepuls dem doppelten Wert des vorangegangenen Pulses entsprach (Abbildung 18). Die Einstellung für die absteigende Energieverteilung erfolgte analog, wobei der Folgepuls-wert jedoch stets halbiert worden ist.

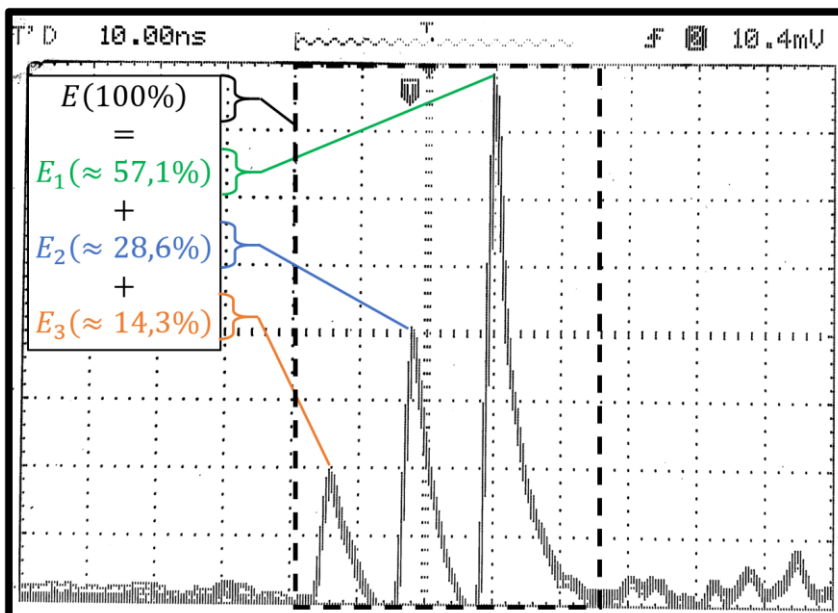


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der aufsteigenden Energieverteilung pro Puls im Burst-Modus mit drei Pulsen pro Burst. (Die absteigende Energieverteilung gilt analog)

Der Burst-Modus $N = 2$ beinhaltet zwei Pulse je Burst, deren zeitlicher Abstand mit $t_{DP} = k \cdot 12,5 \text{ ns}$ bei einem Wert k von eins bis sieben geändert wurde, sodass eine minimale Zeitverzögerung von 12,5 ns und einer maximalen Verzögerung von 87,5 ns realisiert werden konnte. Die Gesamtfluenz umfasste im Burst-Modus $N = 2$ einen Parameterbereich von $1,5 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ und $8 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ (Abbildung 19).

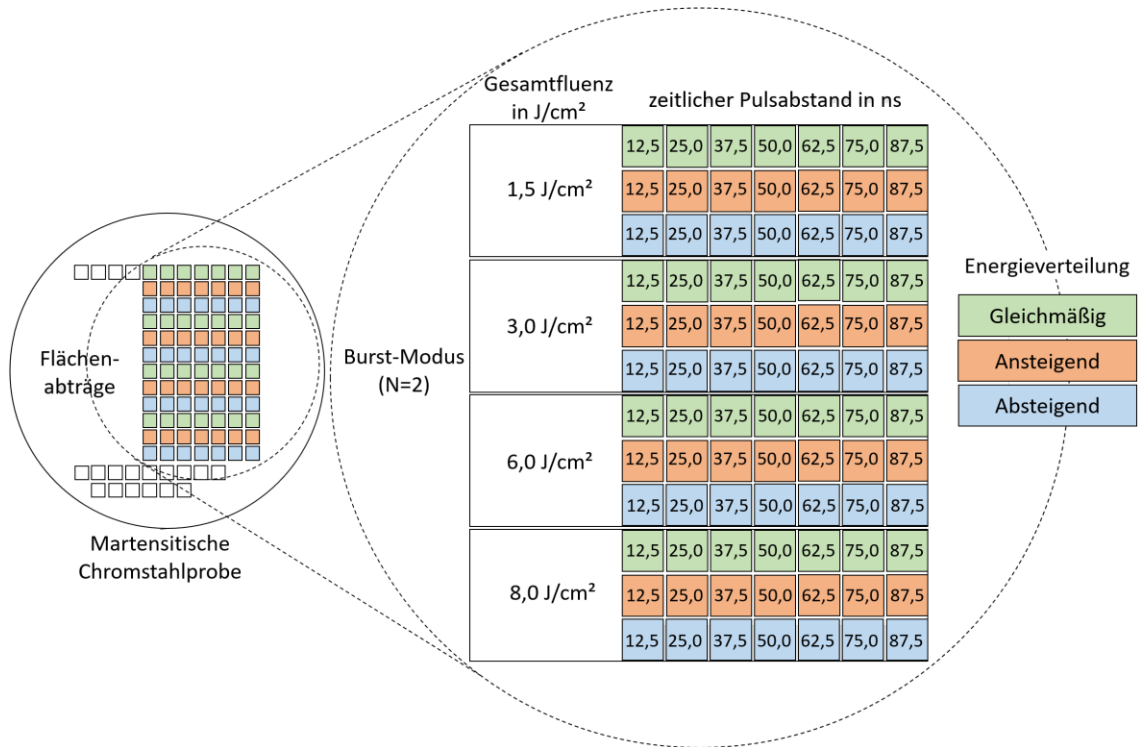


Abbildung 19: Schematische Darstellung der durch den Burst-Modus mit zwei Pulsen ($N = 2$) pro Burst erzeugten Flächenabträge unter Variation der Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J}/\text{cm}^2$ bis $8,0 \text{ J}/\text{cm}^2$, der Energieverteilung je Puls in einem Burst (gleichmäßige, aufsteigende und absteigende Verteilung) und Änderung der zeitlichen Pulsabstände von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$

Für den Burst-Modus $N = 3$ wurde eine Gesamtfluenz von $6 \text{ J}/\text{cm}^2$ und für den Burst-Modus $N = 4$ wurde eine Gesamtfluenz von $8 \text{ J}/\text{cm}^2$ gewählt. Der Burst-Modus $N = 3$ beinhaltet drei Pulse je Burst, deren zeitlicher Abstand innerhalb eines Bereichs von $12,5 \text{ ns}$ und $37,5 \text{ ns}$ variiert worden ist. Für den Burst-Modus $N = 4$ wurden die zeitliche Pulsabstände innerhalb eines Bursts mit $12,5 \text{ ns}$ und $25,0 \text{ ns}$ festgelegt (Abbildung 20).

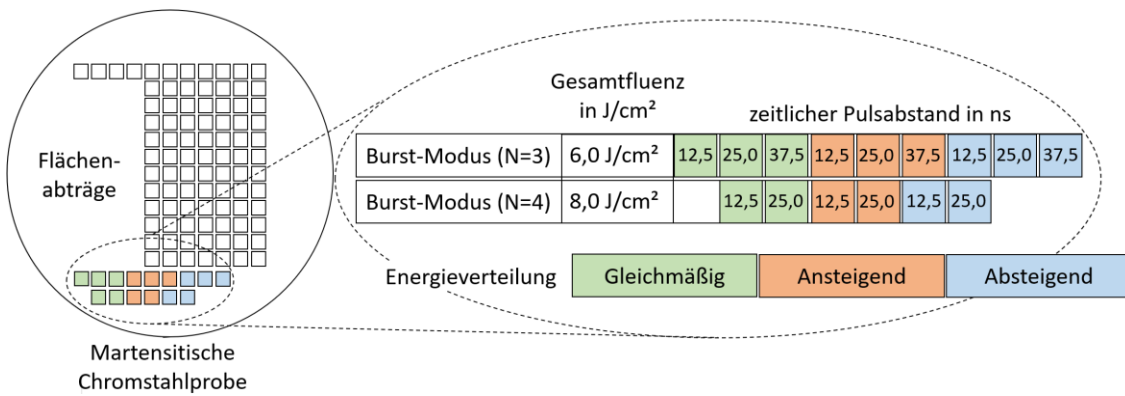


Abbildung 20: Schematische Darstellung der durch die Burst-Modi mit drei Pulsen ($N = 3$) pro Burst und vier Pulsen ($N = 4$) pro Burst erzeugten Flächenabträge unter Variation der Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J}/\text{cm}^2$ für $N = 3$ bzw. $8,0 \text{ J}/\text{cm}^2$ für $N = 4$, der Energieverteilung je Puls innerhalb eines Bursts (gleichmäßige, aufsteigende und absteigende Verteilung) und Änderung der zeitlichen Pulsabstände von $12,5 \text{ ns}$ bis $37,5 \text{ ns}$ für $N = 3$ bzw. $12,5 \text{ ns}$ bis $25,0 \text{ ns}$ für $N = 4$.

Um den Einzelpulsmodus mit den Burst-Modi vergleichen zu können, wurden mit einer Einzelpuls- bzw. Burst-Puls-Wiederholfrequenz von 100 kHz und einem geometrischen Puls- bzw. Burstpulsabstand da und einem Linienabstand db mit je $6 \mu\text{m}$ sowie einer Überfahrtenanzahl $s = 30$ unidirektional Flächenabträge erzeugt. Die quadratischen Flächen hatten eine Kantenlänge l von 1 mm (Abbildung 21).

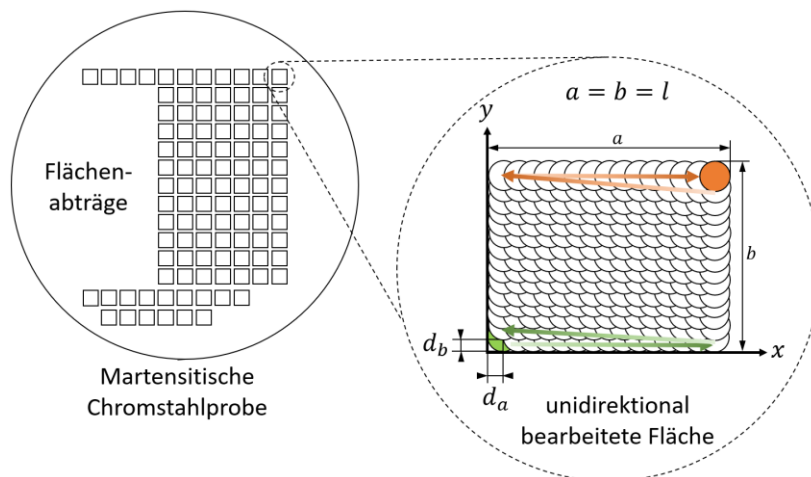


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Überfahrtsführung zur Erzeugung der Flächenabträge

4.4 Analysemethoden

Für die Messungen der Strukturtiefe z und der Oberflächenrauheiten S_a , S_q sowie S_z der erzeugten Flächenabträge in Abhängigkeit von der Fluenz wurde ein konfokales Laserscanning-Mikroskop des Typs Olympus OLS4100 verwendet. Die Definitionen der Oberflächenrauheiten S_a (Arithmetischer Mittelwert der Höhen), S_q (Standardabweichung der Höhen, Mittlere Abweichung der Höhenwerte zum Mittelwert), und S_z (Maximaler Abstandswert zwischen dem höchsten Punkt (Spitze) und dem tiefsten Punkt (Senke)) der vermessenen Flächen sind nach ISO 25178 festgelegt.

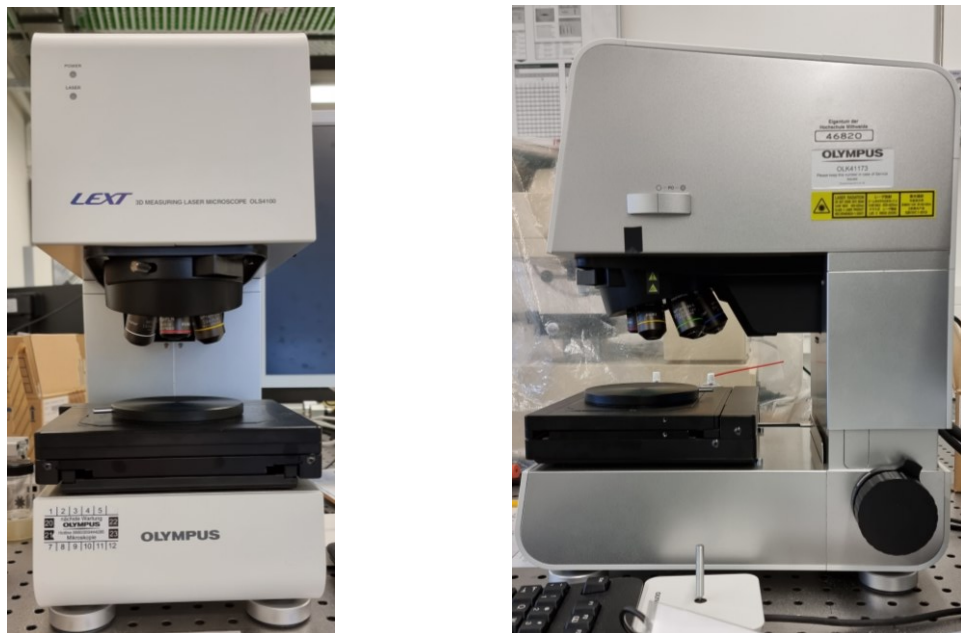


Abbildung 22: Das linke Bild bietet die frontale und das rechte Bild die seitliche Ansicht des Olympus OLS4100

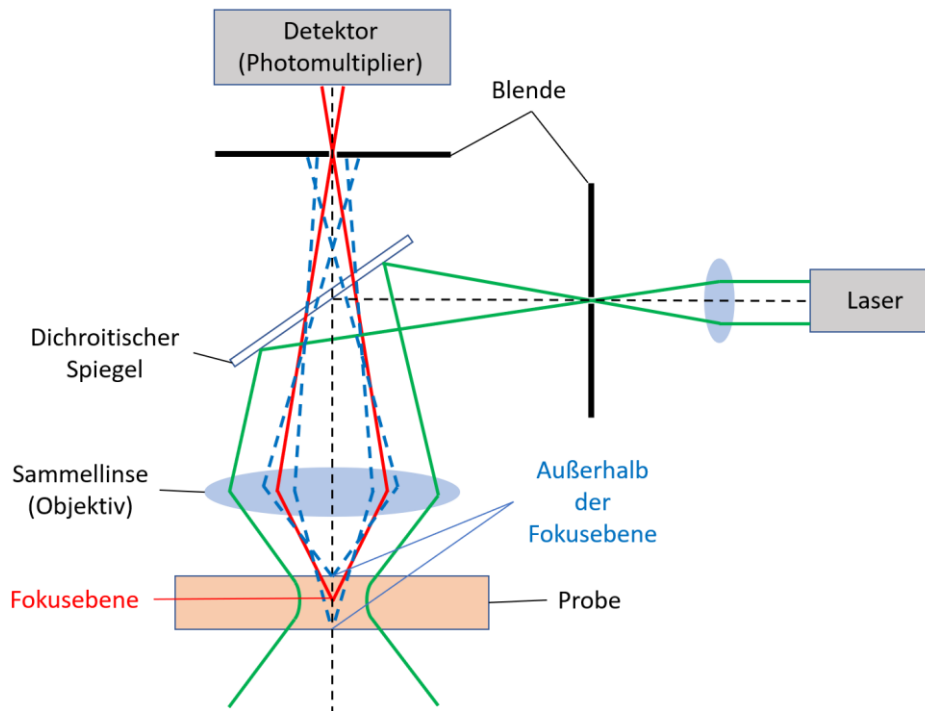


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der konfokalen Laserscanning-Mikroskopie

Unterschied zwischen konventioneller Licht- und konfokaler Laserscanning-Mikroskopie

Der Vorteil einer konfokalen Laserscanning-Mikroskopie (Abbildung 23) gegenüber einer konventionellen Lichtmikroskopie ist die Begrenzung des für die lokale Detektion verwendeten Lichtanteils auf den Fokuspunkt. Eine Blende lässt nur Licht aus dem scharf abgebildeten Bereich zur Detektion zu und blockiert Licht aus anderen Ebenen. Das Ergebnis sind optische Schnittbilder mit hohem Kontrast und ein verbessertes Auflösungsvermögen.

Effizienz

Die effektive Nutzung der zur Verfügung stehenden Pulsenergie zum Materialabtrag ist für die Wirtschaftlichkeit im industriellen Einsatz essentiell. Dabei stellt die Effizienz in der Lasermaterialbearbeitung das Verhältnis von abgetragenen Volumen zur umgesetzten Energie dar. Der Quotient aus dem Abtragsvolumen V und dem Produkt aus der Pulsanzahl N und Pulsenergie Q führte zur Berechnung der Effizienz η und wurde durch folgende Gleichung definiert [65]:

$$\eta = \frac{V}{N \cdot Q} \quad (5.02)$$

Die geometrische Form des ablatierten Volumens kann durch die Dimensionierung der Abtragsfläche mit der Länge a und der Breite b (siehe Abbildung 21) unter Berücksichtigung der Strukturtiefe z , wie folgt beschrieben werden [66]:

$$V_{\text{gesP}} = \frac{z \cdot da \cdot db}{s} \quad (5.03)$$

Um den Beitrag der Pulse zum gesamten Abtragsvolumens V_{gesP_N} diskutieren zu können, wurde folgende Gleichung aufgestellt:

$$V_{aP_N} = V_{\text{gesP}_N} - \sum_{i=1}^{N-1} V_{P_i} \quad (5.04)$$

Die Subtraktion des im Burst-Modus mit einer Pulsanzahl N hervorgerufenen Gesamt-Abtragsvolumens V_{gesP_N} mit der Summe aus den Abtragsvolumina der dem letzten Puls vorangegangenen Pulse V_{P_i} ergibt das Abtragsvolumen des abschließenden Pulses eines Bursts V_{aP_N} .

Eine Berechnung der Abtragsvolumen pro Puls ist nur für den letzten Puls eines Bursts möglich. Für die Burst-Modi $N = 3$ und $N = 4$ wurden zur Berechnung der Abtragsvolumen der abschließenden Pulse die entsprechenden Abtragsvolumen der abschließenden Pulse bei einer niedrigeren Pulsanzahl innerhalb eines Bursts mit adäquater Fluenz $V_{aP_{N-1}}$ gewählt. Die Abtragsvolumen des Einzelpulsmodus V_{EP} mit entsprechender Fluenz stellen hierbei das jeweils erste Abtragsvolumen V_{P_1} dar. Es ergeben sich anhand der Gleichung (5.04) folgende Zusammenhänge:

$$\text{Für } N = 2 \quad V_{aP_2} = V_{\text{gesP}_2} - V_{P_1} \quad (5.05)$$

$$V_{aP_2} = V_{\text{gesP}_2} - V_{EP}$$

$$\text{Für } N = 3 \quad V_{aP_3} = V_{\text{gesP}_3} - (V_{P_2} + V_{P_1}) \quad (5.06)$$

$$V_{aP_3} = V_{\text{gesP}_3} - (V_{aP_2} + V_{EP})$$

$$\text{Für } N = 4 \quad V_{aP_4} = V_{\text{gesP}_4} - (V_{P_3} + V_{P_2} + V_{P_1}) \quad (5.07)$$

$$V_{aP_4} = V_{\text{gesP}_4} - (V_{aP_3} + V_{aP_2} + V_{EP})$$

Die Abtragsvolumen der jeweils letzten Pulse für die Burst-Modi mit 2 bis 4 Pulsen pro Burst konnten so ermittelt werden. Dabei stellt in den Gleichung 5.05 als $V_{\text{ges}P_2}$ definiert das Abtragsvolumen im Burst-Modus mit $N = 2$ bei einer Fluenz von $1,50 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, $3,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, $6,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bzw. $8,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ und für V_{EP} das Abtragsvolumen im Einzelpulsmodus mit $0,75 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, $1,50 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, $3,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ bzw. $4,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ dar. Das in den Gleichungen 5.06 und 5.07 als $V_{\text{a}P_2}$ definierte Abtragsvolumen entspricht dem Abtragsvolumen des zweiten Pulses im Burst-Modus mit $N = 2$ bei einer Fluenz von $4,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Die Gleichung 5.07 enthält zusätzlich das Abtragsvolumen des dritten Pulses V_{P_3} im Burst-Modus mit $N = 3$ bei einer Fluenz von $6,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Alle Pulse für die Burst-Modi $N = 3$ und $N = 4$ verfügten jeweils über eine Fluenz von $2,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$. Das in der Gleichung 5.06 als $V_{\text{ges}P_3}$ formulierte Abtragsvolumen wurde für eine Fluenz von $6,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, dass in Gleichung 5.07 als $V_{\text{ges}P_4}$ formulierte Abtragsvolumen für eine Fluenz von $8,00 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ definiert.

Aufnahmen der Strukturböden mit dem Rasterelektronenmikroskop

Zur qualitativen Vergleichbarkeit der Ergebnisse konnten im Zuge dieser Arbeit Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop des Typs Jeol JSM-6510LV mit einem Detektor der Serie XFlash Detector des Herstellers Bruker mit 2000-facher Vergrößerung gemacht werden (Abbildung 24).

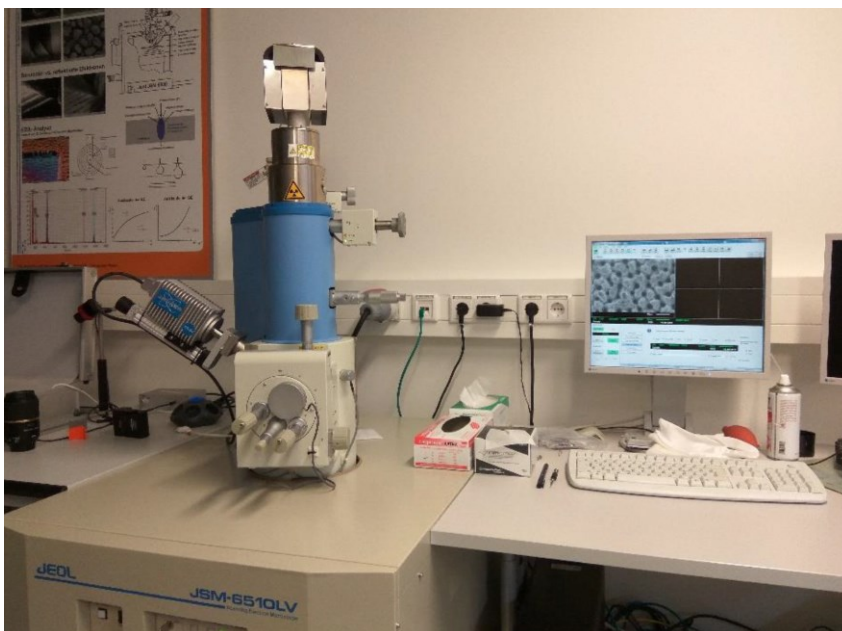


Abbildung 24: Das verwendete REM Jeol JSM-6510LV

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der bei der Versuchsdurchführung erzeugten Flächenabträge vorgestellt und diskutiert. Die Schwerpunkte wurden dabei auf die erzeugten Abtragsvolumen, Abtragseffizienzen und den erzeugten Oberflächenrauheitswerten gelegt. Für die Bestimmung der Abtragsvolumen und -effizienzen der mit ultrakurzen Einzel- und Doppelpulsen erzielten Ergebnisse wurden die Gleichungen aus dem Kapitel 4.4 – Analysemethoden verwendet. Auf die Ergebnisse des Einzelpulsmodus folgen die Ergebnisse des Burst-Modus. Letztere wurden zu einer genaueren Unterscheidung in die Unterkapitel Doppelpulse und Multipulse unterteilt. Das Ende des Kapitels bildet ein abschließender Vergleich.

5.1 Einzelpulsmodus

Basierend auf den gemessenen Strukturtiefen und Rauheiten werden in diesem Unterkapitel die ermittelten Abtragsvolumen, Effizienzen und Oberflächenrauheiten bei der Verwendung des Einzelpulsmodus präsentiert und diskutiert. Zu den quantitativen Ergebnissen werden die Auswertungen und Diskussionen durch REM Aufnahmen der jeweiligen Strukturböden qualitativ unterstützt.

Abtragsvolumen und Abtragseffizienzen

Die ermittelten Abtragsvolumina bei der Verwendung des Einzelpulsmodus in Abhängigkeit von der Fluenz werden in **Abbildung 25** **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass bei einer Fluenz von 1 J/cm^2 ein Abtragsvolumen von ca. $6 \mu\text{m}^3$ und bei einer Fluenz von 8 J/cm^2 ca. $19 \mu\text{m}^3$ ermittelt wurden. Demzufolge wird im Vergleich zu einer Fluenz von 1 J/cm^2 bei der achtfach höheren Fluenz lediglich das etwa Dreifache abgetragen. Schlussfolgernd führt eine Erhöhung der Fluenz nicht linear zu einem höheren Abtragsvolumen, sodass, wie ebenfalls in **Abbildung 25** gezeigt, die Abtragseffizienz bei zunehmender Fluenz abnimmt. Eine Erklärung kann anhand der Ablationsschwelle von Edelstahl erfolgen. Werden geringere Fluenzen genutzt, sodass das Spallations-Regime nicht erreicht wird, dann führt die Wechselwirkung der propagierten Energie mit der Materialoberfläche vornehmlich zum Aufschmelzen bzw. Erhitzen. Eine Wechselwirkung unter dem Einfluss von höheren Fluenzen im Regime der Phasenexplosion wird hingegen zum Großteil für die Ionisierung aufgewandt [20]. Die Verwendung von Fluenzen innerhalb des Spallations-Regimes führt entsprechend zum effizientesten Volumenabtrag.

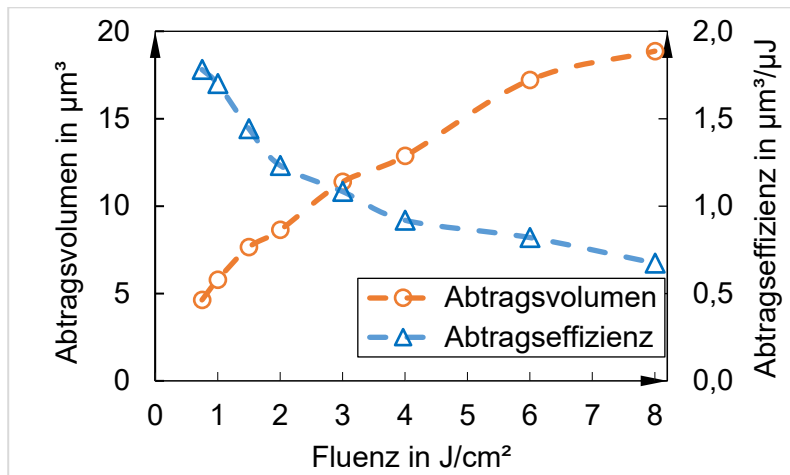


Abbildung 25: linke Ordinate: Abhängigkeit des Abtragsvolumens von der Fluenz, rechte Ordinate: Abhängigkeit der Abtragseffizienz von der Fluenz, bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Einzelpulsmodus

Rauheiten

Die vermessenen Rauheiten der Strukturböden werden in Abbildung 26 präsentiert und veranschaulichen das Verhalten der gemittelten Oberflächenrauheit S_a bei einer Erhöhung der Fluenz. Eine Erhöhung der Fluenz von 1 J/cm² auf 8 J/cm² bewirkt demnach eine Steigerung der mittleren Oberflächenrauheit von 458 nm auf 4602 nm.

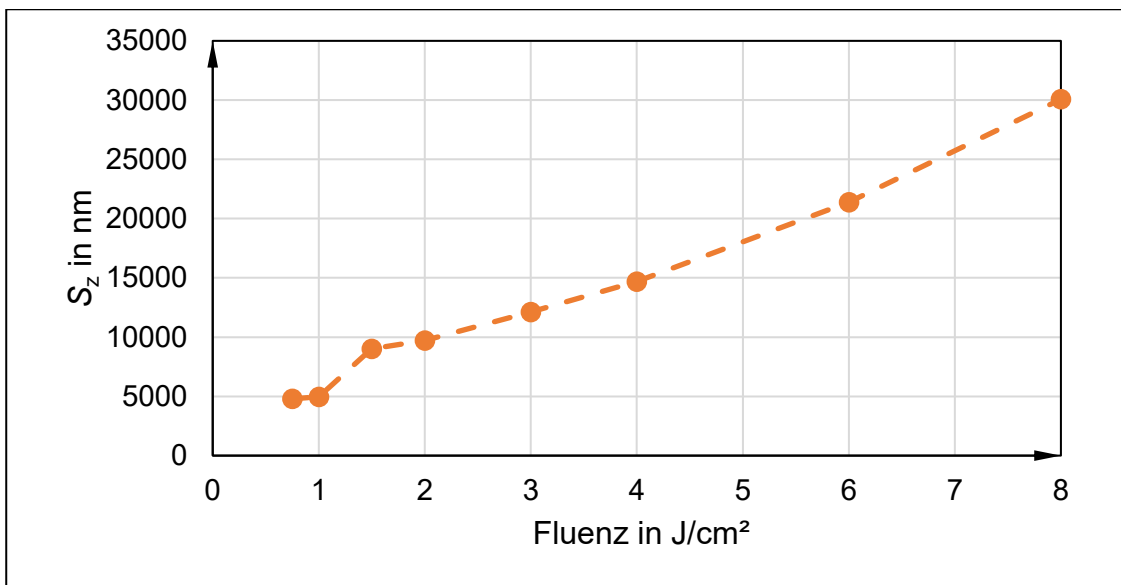


Abbildung 26: Oberflächenrauheiten der erzeugten Strukturböden bei der Verwendung des Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen in Abhängigkeit von der Fluenz und einer Überfahrtenanzahl von 30.

Dieses Phänomen wird durch die in Abbildung 27 visualisierten Oberflächenstrukturen durch die Bildung von LIPSS (oben links) und CLP (beginnend oben rechts) erklärbar.

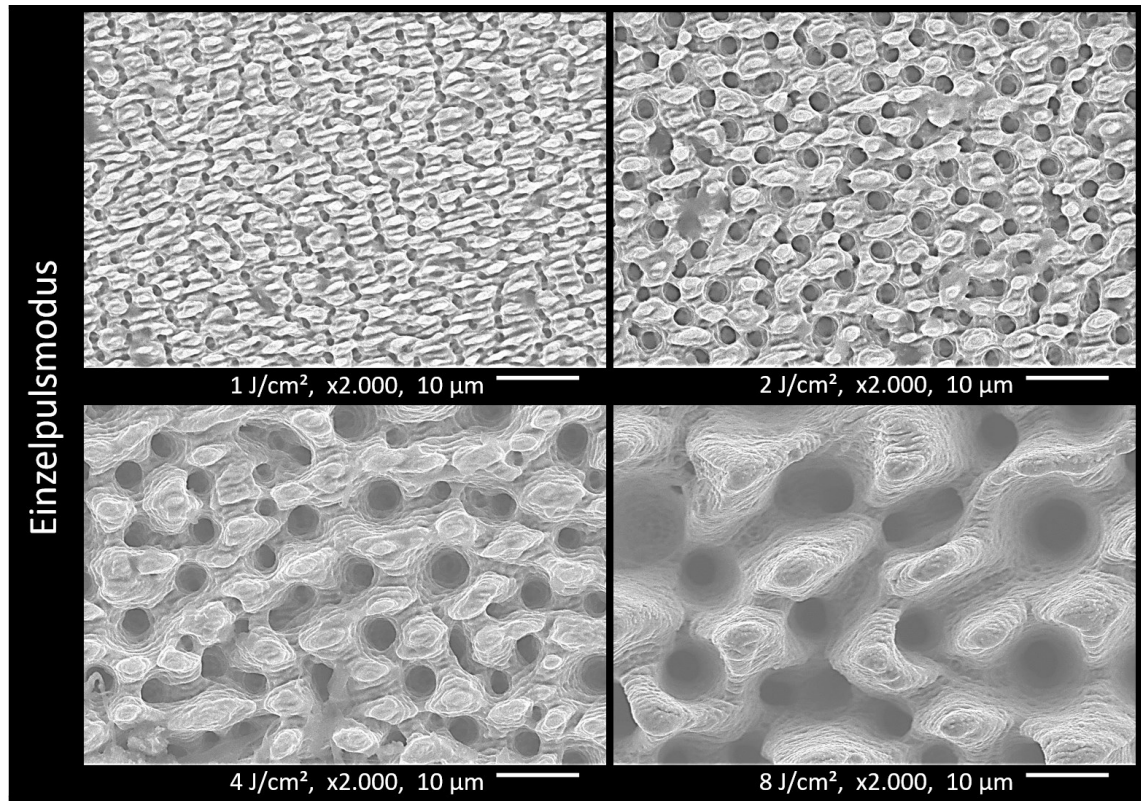


Abbildung 27: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Einzelpulsmodus bei den Fluenzen von 1 - 8 J/cm²

LIPSS, d.h. Laser-Induced Periodic Surface Structures, bezeichnen parallellaufende und teils wellenförmige Strukturen, die bei der Verwendung ultrakurz gepulster Laserstrahlung in vielen Studien beobachtet wurden (Abbildung 27 oben links) [7,65,67]. Der genaue Zusammenhang wird jedoch aktuell noch untersucht. Bisher ist jedoch bekannt, dass es bestimmte Kategorien von LIPSS gibt, deren geometrische Struktur von der Wellenlänge der Laserstrahlung, von der Fluenz, von der Pulsdauer sowie den optischen und physikalischen Materialeigenschaften abhängig ist [11,67]. Anhand Abbildung 27 wird deutlich, dass schon bei einer Fluenz von 1,0 J/cm² diese LIPSS vergleichsweise tief sind und sich teilweise zapfenartige Strukturen ausgebildet haben. Die durch den laserinduzierten Bearbeitungsprozess hervorgerufenen Zapfenstrukturen werden dabei als cone-like-protrusion (CLP) bezeichnet. Die genauen Zusammenhänge zur Entstehung dieser zapfenartigen Strukturen sind allerdings noch nicht abschließend geklärt und der Gegenstand aktueller Forschung.

In neueren Studien wurden jedoch Schlackeneinschlüsse aus dem Stahlherstellungsprozess als Ursprung der Zapfen identifiziert, bei denen es sich hauptsächlich um Aluminium- und Magnesiumoxide handelt [68]. Die Entstehung der CLP-Strukturen wird allerdings erst bei einem Abtrag von mehreren Schichten Material beobachtet [68]. Eine Erhöhung der Fluenz führt in der Folge des Wärmestaus zum Wachstum von thermischen LIPSS, die senkrecht zu den durch linear-polarisierte Strahlung hervorgerufenen stehen [69]. Die in die Wechselwirkungszone eingekoppelte Energie kann dementsprechend auf drei verschiedenen Arten von der Materialoberfläche absorbiert werden.

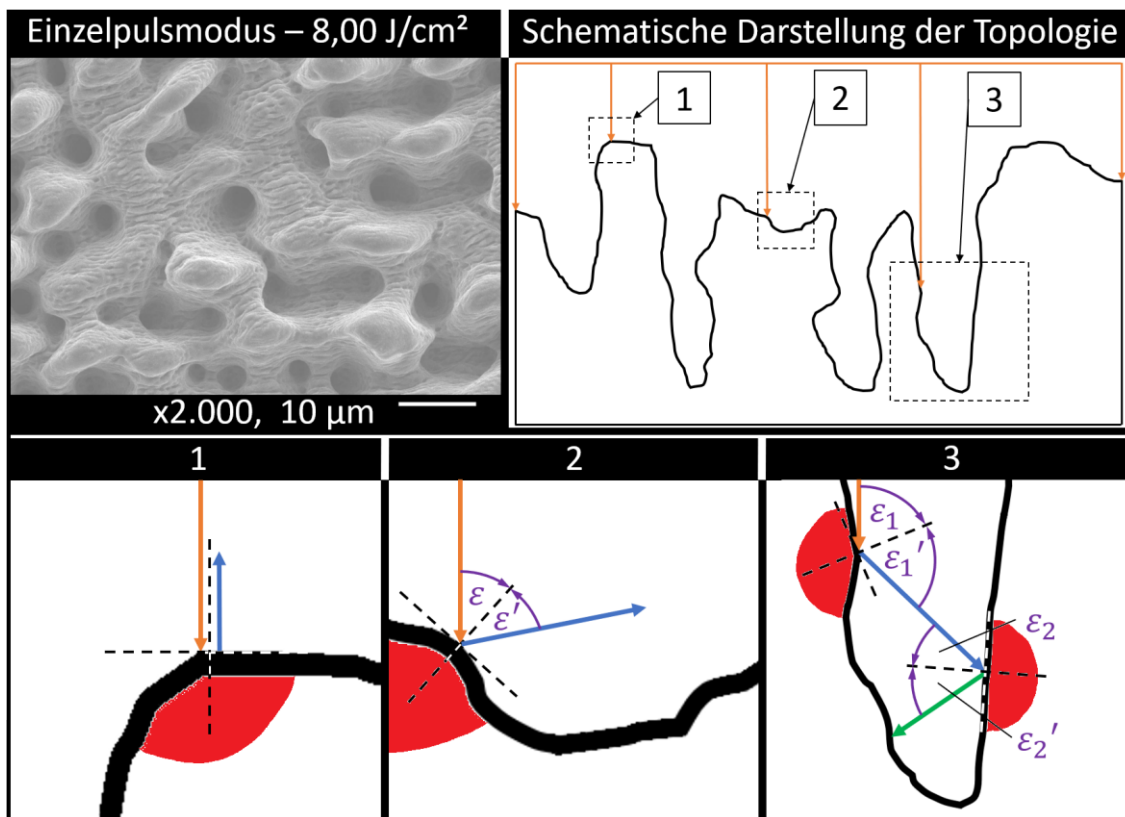


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Auftretens von Abtragsunterschieden bei unterschiedlicher Artung der Oberfläche mit welcher der Laserstrahl wechselwirkt. Der einfallende Strahlanteil wird hierbei orange, der reflektierte Strahlanteil blau und in der Folge erneut reflektierte Strahlanteil grün dargestellt.

Trifft der Laserstrahl auf eine plane Oberfläche, (Teilbild 1 der Abbildung 28), dann werden Teile der Energie in Abhängigkeit des materialspezifischen Reflexionsgrades vom Material absorbiert und reflektiert. Ein senkrecht zum Wechselwirkungsbereich einfallender Strahl koppelt dabei größten Teil der Energie in das Material ein. Im Teilbild 2 wird durch die Winkelabhängigkeit des Reflexionsgrades weniger Energie von der Materialoberfläche absorbiert und mehr der noch übrigen Energie von der Oberfläche wegreflektiert. Das dritte Teilbild stellt den Hintergrund für die Entstehung der Löcher durch die

ausgebildeten CLP dar. Die propagierte Laserstrahlung wird durch die Reflektion an den Kanten der Zapfen in Richtung der Lochböden geführt. Die Folge hieraus ist die Entstehung von immer tieferen und ausgeprägteren Löchern (Abbildung 27) in der Wechselwirkungszone. Mit der Erhöhung der Fluenz kann dieser Effekt noch weiter verstärkt werden [70] (Abbildung 28). In einer weiteren Studie deutete sich an, dass auch die Verwendung eines Prozessgases zu einer Variation der erzeugten Strukturen führen kann [71].

Die Tiefe der LIPSS nimmt innerhalb des gewählten Parameterbereichs von $0,75 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 immer weiter zu. Eine mögliche Erklärung für diese Veränderung der LIPSS können ebenfalls auftretende Absorptionsunterschiede sein, die infolge der auftretenden Oberflächenmodifikation durch vorangegangene Pulse entstehen (Abbildung 28). Durch die vergleichsweise langen zeitlichen Pulsabstände und die hierbei nicht durch Wärmeakkumulation hervorgerufene Bildung eines Schmelzfilms, bleibt eine Glättung der rauen Oberfläche aus.

5.2 Burst-Modus

Wie im Kapitel 4.3 – Untersuchter Parameterbereich beschrieben, wurde eine Anpassung der Energieverteilung auf die Pulse innerhalb eines Bursts für einen definierten Bereich der Gesamtfluenz, der Pulsanzahl und des zeitlichen Intra-Burstabstands vorgenommen. Eine Aufgliederung des Kapitels wurde dabei in die Ergebnisse bei der Nutzung von Doppelpulsen und Multipulsen unternommen.

5.2.1 Doppelpulse (Burst-Modus (N=2))

Abtragsvolumen und Abtragseffizienzen

Die ermittelten Abtragsvolumina und -effizienzen bei der Verwendung des Doppelpulsmodus bei einer Variation der Gesamtfluenz in einem Bereich von $1,5 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts, beginnend mit $12,5 \text{ ns}$ und endend mit $87,5 \text{ ns}$, werden für die drei gewählten Energieverteilung in der Abbildung 29 (gleichmäßig), der Abbildung 30 (ansteigend) und der Abbildung 31 (absteigend) dargestellt. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

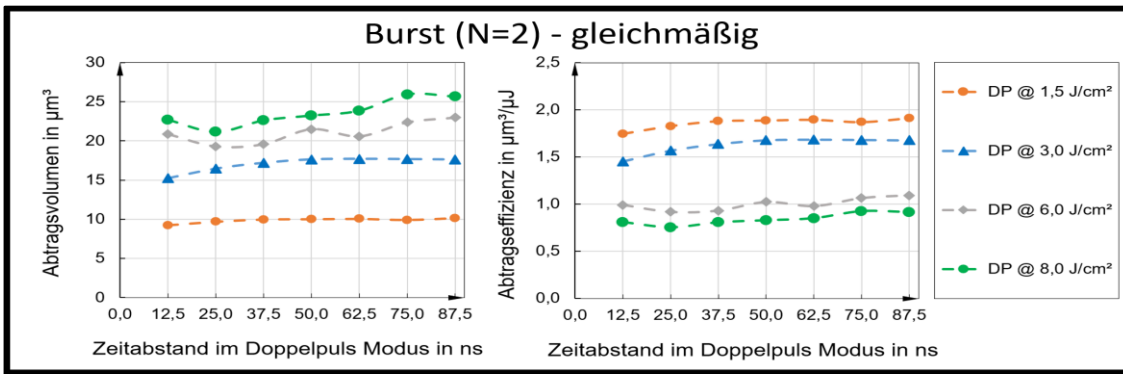


Abbildung 29: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtrageffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von 1/2 (erster Puls) und 1/2 (zweiter Puls).

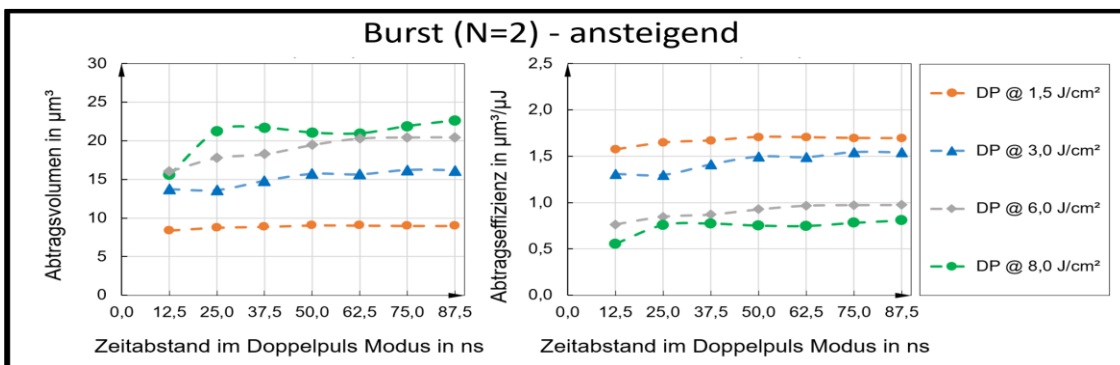


Abbildung 30: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtrageffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von 1/4 (erster Puls) zu 3/4 (zweiter Puls).

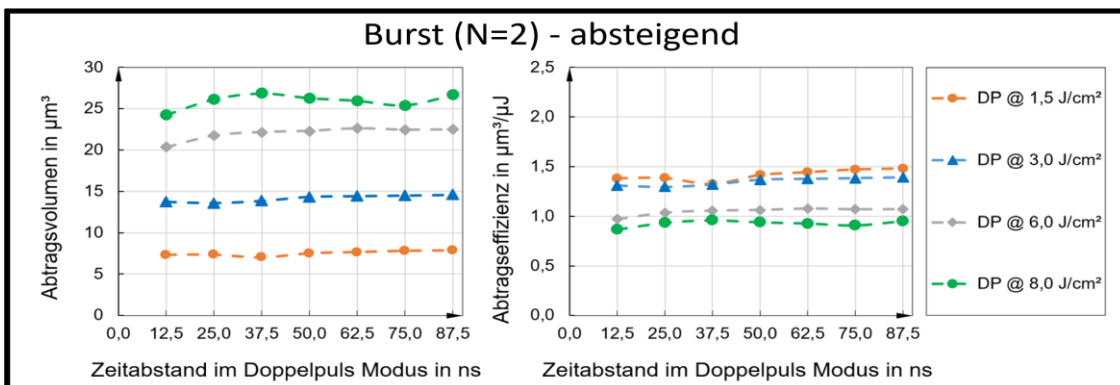


Abbildung 31: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtrageffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von 3/4 (erster Puls) zu 1/4 (zweiter Puls).

Dabei wird ersichtlich, dass eine Steigerung der Gesamtfluenz stets zu einer Erhöhung des Abtragsvolumens und einer Minderung der Abtragseffizienz geführt hat. Bei einem zeitlichen Intra-Burstabstand von 12,5 ns und einer gleichmäßigen Energieverteilung wurde bei einer Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² ein Abtragsvolumen von ca. 9 μm³ und bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm² ein Abtragsvolumen von ca. 21 μm³ ermittelt. Eine ansteigende Energieverteilung mit demselben zeitlichen Pulsabstand führte bei einer Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² zu einem Abtragsvolumen von ca. 8 μm³ und bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm² zu einem Abtragsvolumen von ca. 16 μm³. Die Steigerung der Gesamtfluenz auf einen vierfachen Wert führte demzufolge lediglich zu einer Verdoppelung des abgetragenen Volumens. Die Änderung auf eine absteigende Energieverteilung führte bei einem zeitlichen Intra-Burstabstand von 12,5 ns und einer Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² zu ein Abtragsvolumen von ca. 7 μm³ und bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm² ein Abtragsvolumen von ca. 20 μm³. Das Abtragsvolumen wurde durch die Erhöhung der Gesamtfluenz um den Faktor vier hierbei nicht nur verdoppelt, sondern verdreifacht. Dieses Verhalten lässt die Schlussfolgerung zu, dass eine Erhöhung der Gesamtfluenz nicht linear zu einer Erhöhung des Abtragsvolumens verläuft und die Abtragseffizienz mit zunehmender Fluenz abnimmt. Das Verhalten konnte gleichsam für alle drei Energieverteilung ausgemacht werden.

Die Änderung der Energieverteilung nimmt mit dem Anstieg der Gesamtfluenz einen immer stärker werden Einfluss auf das Abtragsvolumen in Abhängigkeit zum zeitlichen Intra-Burstabstand. Die Abtragsvolumen bei einer gleichmäßigen Energieverteilung konnten bei einem Intra-Burstabstand von 12,5 ns für eine Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² mit ca. 9 μm³, 3 J/cm² mit ca. 15 μm³, 6 J/cm² mit ca. 21 μm³ und 8 J/cm² mit ca. 23 μm³ ermittelt werden. Mit einer Vergrößerung des zeitlichen Intra-Burstabstandes auf 87,5 ns stiegen die Abtragsvolumen für eine Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² auf ca. 10 μm³, 3 J/cm² mit ca. 18 μm³, 6 J/cm² mit ca. 23 μm³ und 8 J/cm² mit ca. 26 μm³ an. Die Abtragsvolumen wurden demnach für eine Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² um ca. 11 %, 3 J/cm² um ca. 20 %, 6 J/cm² um ca. 10 % und 8 J/cm² um ca. 13 % gesteigert. Für eine ansteigenden Energieverteilung wurden mit der Vergrößerung des Intra-Burstabstandes vom geringsten zum höchsten Abstand Erhöhungen der Abtragsvolumen für eine Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² um ca. 11 %, 3 J/cm² um ca. 14 %, 6 J/cm² um ca. 25 % und 8 J/cm² um ca. 43 % ermittelt. Die ermittelten Steigerungen der abgetragenen Volumen durch Variation der zeitlich Pulsabstände von 12,5 ns auf 87,5 ns hat bei einer absteigenden Energieverteilung für eine Gesamtfluenz von 1,5 J/cm² um ca. 14 %, 3 J/cm² um ca. 7 %, 6 J/cm² um ca. 13 % und 8 J/cm² um ca. 10 % ergeben. Einer ansteigenden Energieverteilung nimmt demnach den größten Einfluss auf die erzeugbaren Abtragsvolumen in Abhängigkeit von der Gesamtfluenz, bewirkt jedoch gleichzeitig im Vergleich zu einer

gleichmäßigen bzw. absteigenden Verteilung eine Verringerung des abgetragenen Volumens. Eine mögliche Ursache für das Verhalten bei einer ansteigender Energieverteilung könnte die durch den ersten Puls hervorgerufene Ablationswolke sein, die bspw. bei einer Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 mit einer Fluenz von ca. 2 J/cm^2 hervorgerufen wird und damit über der Ablationsschwelle von Edelstahl liegt. Bei sehr kurzen Zeitintervallen zwischen den Pulsen wird, wie im Kapitel 3.4 schon beschrieben, ein Teil der Energie des zweiten Pulses durch die hohe Teilchendichte der Ablationswolke abgeschirmt. Durch die Vergrößerung des Intra-Burstabstands kommt es zu einer Expansion der Ablationswolke und ein größerer Anteil an Strahlungsenergie des zweiten Pulses kann von der Materialoberfläche für den Ablationsprozess absorbiert werden. Die durch den ersten Puls hervorgerufene Oberflächenmodifikation führt zu einer Optimierung der Absorptionseigenschaften in der Wechselwirkungsstelle, sodass zusätzlich mehr Energie des zweiten Pulses vom Material absorbiert werden kann. Bezüglich des Abtragsverhaltens bei einer absteigenden Energie kann ebenfalls eine Begründung anhand der durch den ersten Puls in die Materialoberfläche eingekoppelten Energie erfolgen. Der erste Puls besitzt hierbei ein dreiviertel der Gesamtenergie (z.B. Gesamtfluenz $8 \text{ J/cm}^2 \approx 6 \text{ J/cm}^2$). Die Gesamtfluenz wird entsprechen fast vollständig vom ersten Puls in die Wechselwirkungszone eingekoppelt, sodass ein größerer Materialabtrag bewirkt werden kann. Im Vergleich zum Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen wurde bei der Verwendung des Doppelpulsmodus mit analogen Gesamtfluenzen stets mehr Volumen abgetragen.

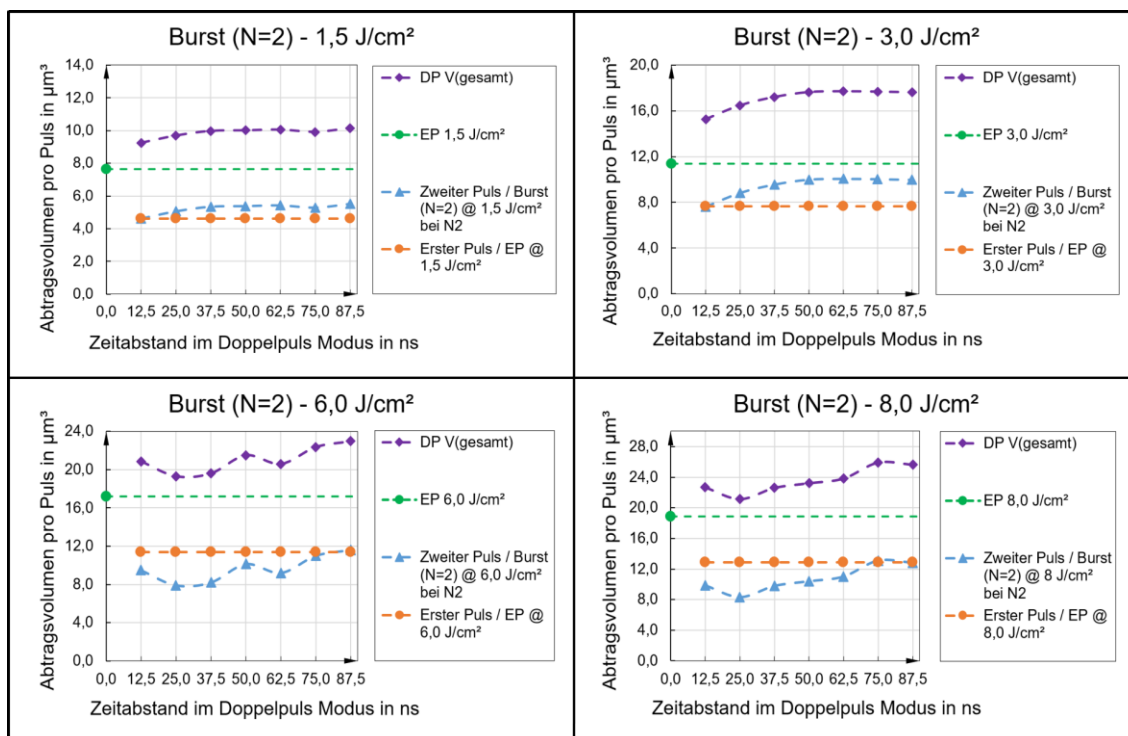


Abbildung 32: Gegenüberstellung der Abtragsvolumen pro Puls innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand für die Gesamtfluenzen

1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von 1/2 (erster Puls) und 1/2 (zweiter Puls).

Eine Erklärung kann hierfür über den Inkubationseffekt oder thermische Einflüsse wie die Akkumulation von Restwärme des ersten Pulses geschlussfolgert werden. Das im Einzelpulsmodus mit einer Fluenz von 1,5 J/cm² ermittelte Abtragsvolumen von 7,7 µm³ wurde dabei durch die Nutzung des Doppelpulsmodus mit vergleichbarer Gesamtfluenz auf einen Wert von bis zu 10,2 µm³ gesteigert (≈ 32 %); für die (Gesamt-)Fluenz von 3,0 J/cm² von 11,4 µm³ auf bis zu 17,6 µm³ (≈ 55 %), von 6,0 J/cm² von 17,2 µm³ auf bis zu 23,0 µm³ (≈ 34 %) und von 8,0 J/cm² von 18,9 µm³ auf bis zu 26,0 µm³ (≈ 38 %). Die höchsten Abtragsunterschiede wurden für die Gesamtfluenzen des gewählten Parameterbereichs allerdings erst bei einer Vergrößerung des zeitlichen Intra-Burstabstand erreicht. Eine Erklärung kann für die Gesamtfluenzen von 1,5 J/cm² und 3, J/cm² über den Inkubationseffekt oder thermische Einflüsse wie die Akkumulation von Restwärme des ersten Pulses und für die Gesamtfluenzen von 6 J/cm² und 8 J/cm² mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der durch den ersten Puls erzeugten Ablationswolke erfolgen.

Beitrag des zweiten Pulses zum Gesamt-Abtragsvolumen

Anhand der ermittelten Abtragsvolumen im Einzelpulsmodus für die Fluenzen von $1,5 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 können die Differenzen aus dem Gesamt-Abtragsvolumen im Doppelpulsmodus für die Gesamtfluenzen von $1,5 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 bei einer gleichmäßigen Energieverteilung bestimmt werden. Diese repräsentiert dabei das Abtragsvolumen des zweiten Pulses. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 32 dargestellt und demonstrieren, dass der zweite Puls im Doppelpulsmodus bei einer Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ und $3,0 \text{ J/cm}^2$ ab einem untersuchten Zeitabstand von $25,0 \text{ ns}$ wesentlich mehr Material abträgt. Jedoch ist der Abtrag pro Puls im Vergleich zum Einzelpulsmodus mit analogen Fluenzen nur bei einer Summation der beiden Pulse des Doppelpulsmodus höher. Ebenso ist zu erkennen, dass im Doppelpulsmodus mit einer höheren Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 und 8 J/cm^2 und bei einem geringen zeitlichen Intra-Burstabstand die Abschirmung des zweiten Pulses durch eine gegebene Ablationswolke sehr stark ausprägt ist. Erst bei ca. 75 ns bzw. $87,5 \text{ ns}$ wird ein tendenziell gleicher Abtrag des ersten und zweiten Pulses erreicht und die Ablationswolke hat keinen Einfluss mehr auf den Abtragsprozess.

Rauheiten

Die gemessenen Oberflächenrauheiten S_a der erzeugten Strukturböden bei der Verwendung des Doppelpulsmodus unter Variation der Gesamtfluenz in einem Bereich von $1,5 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Burst beginnend mit $12,5 \text{ ns}$ und endend mit $87,5 \text{ ns}$ werden für die drei gewählten Energieverteilung in der Abbildung 33 (50 % / 50 % (gleichmäßig)), der Abbildung 34 (25 % / 75 % (ansteigend)) und der Abbildung 35 (75% / 25 % (absteigend)) dargestellt.

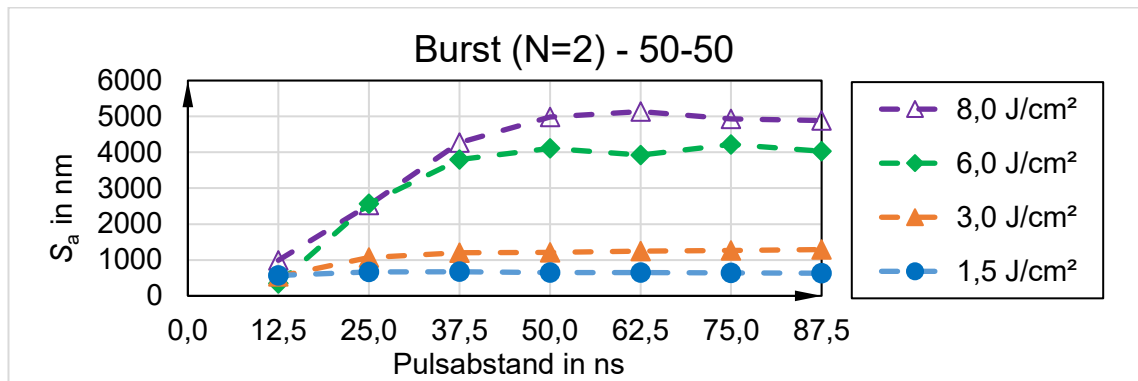


Abbildung 33: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von 1/2 (erster Puls) und 1/2 (zweiter Puls).

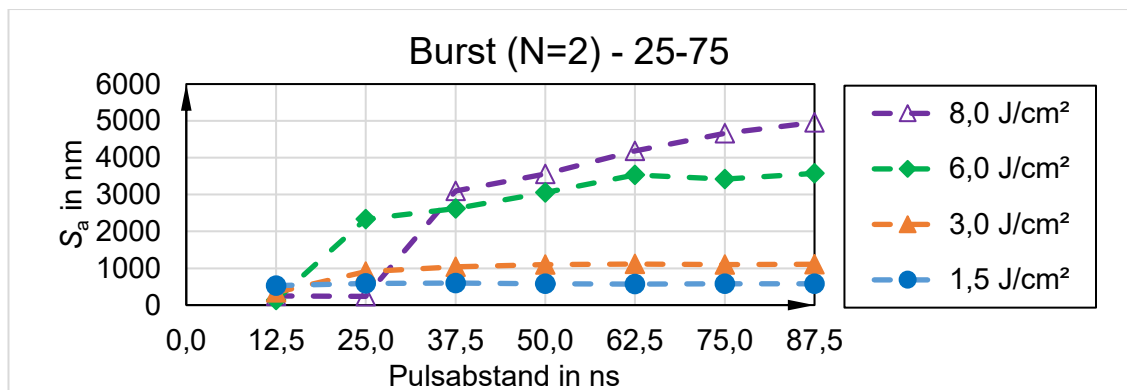


Abbildung 34: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von 1/4 (erster Puls) zu 3/4 (zweiter Puls).

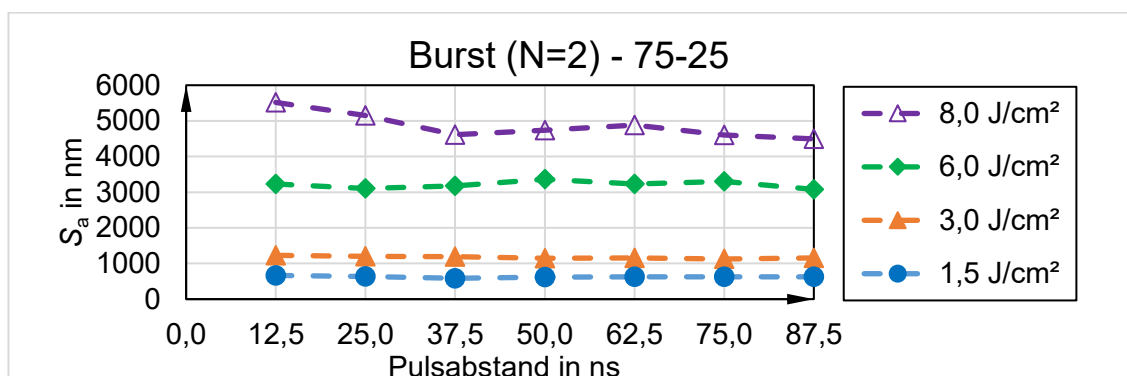


Abbildung 35: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenzen 1,5 J/cm², 3,0 J/cm², 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von 3/4 (erster Puls) zu 1/4 (zweiter Puls).

Die ermittelten Werte können hierfür aus den Tabelle 14, Tabelle 15 und Tabelle 16 entnommen werden. Bei einer Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ (zweimal je $0,75 \text{ J/cm}^2$) mit gleichmäßiger Energieverteilung pro Puls, wurde beim kürzesten Zeitabstand von $12,5 \text{ ns}$ ein Wert von 569 nm gemessen und ist damit etwa 30% geringer als der im Einzelpulsmodus bei einer Fluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ ermittelten Wert von 736 nm . Die Nutzung des Doppelpulsmodus führte demnach zu einer Verringerung der mittleren Oberflächenrauheit. Eine Begründung kann anhand der Fluenz pro Puls innerhalb eines Bursts erfolgen. Im Doppelpulsmodus mit gleichmäßiger Energieverteilung entspricht die Fluenz pro Puls der Hälfte der Gesamtfluenz. Die dabei verringerte Fluenz führt zu den anhand der im Kapitel 3.4 genannten Phänomenen. Bei einer weiteren Erhöhung des Zeitabstandes nimmt die mittlere Oberflächenrauheit bis auf einen Wert von 630 nm geringfügig zu und bleibt damit tendenziell unabhängig vom zeitlichen Intra-Burstabstand. Für eine höhere Gesamtfluenz innerhalb des gewählten Parameterbereichs nimmt der Einfluss des zeitlichen Pulsabstandes mit einer steigenden Fluenz zu. Eine Vergrößerung des Intra-Burstabstandes auf $25,0 \text{ ns}$ führt für die Gesamtfluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ zu einer Erhöhung des S_a -Wertes von 540 nm auf 1069 nm . Bei einer weiteren Vergrößerung der zeitlichen Pulsabstände verringert sich jedoch der Einfluss auf die mittlere Oberflächenrauheit, sodass sich die Werte tendenziell kaum ändern. Für die hohen gewählten Gesamtfluenzen von 6 J/cm^2 und 8 J/cm^2 ist der Einfluss der Intra-Burstabstände auf die S_a -Werte bis zum Erreichen von ca. 50 ns deutlich stärker ausgeprägt. Eine mögliche Begründung für das Ansteigen der Oberflächenrauheit wird exemplarisch durch die in Abbildung 36 präsentierten REM Aufnahmen ersichtlich, wo die LIPSS-Tiefe und CLP-Strukturen bei einer Erhöhung des Zeitabstandes zunehmen. Eine Schlussfolgerung infolge des Inkubationseffekts oder aber auch thermischer Einflüsse wie die Akkumulation von Restwärme des ersten Pulses kann hierbei erfolgen.

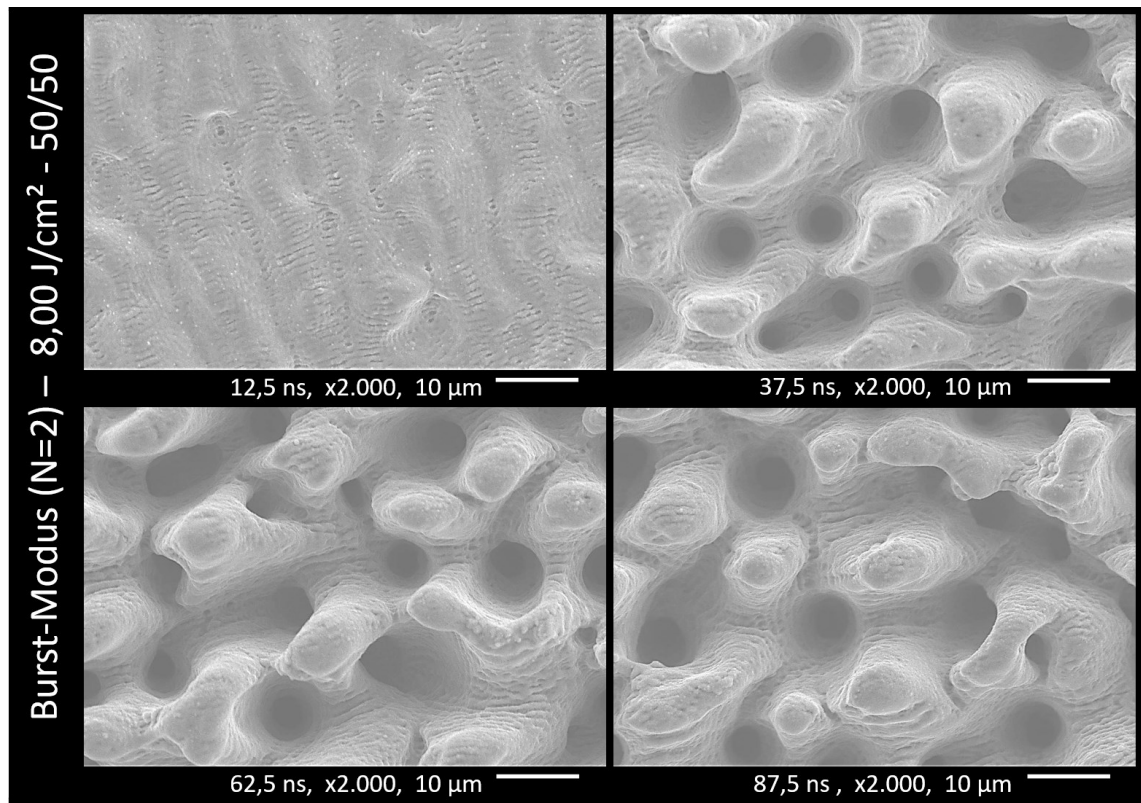


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $8,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls).

Mit der Änderung der Energieverteilung nach dem beschriebenen aufsteigenden Muster ergab sich für eine Gesamtfluenz des gewählten Parameterbereichs von $1,5 \text{ J/cm}^2$ bis $8,0 \text{ J/cm}^2$ ein ganz ähnliches Verhalten bei den ermittelten Werten für die mittlere Oberflächenrauheit in Abhängigkeit zum Intra-Burstabstand. Beginnend mit einem Intra-Burstabstand von $12,5 \text{ ns}$ waren die S_a -Werte am geringsten und stiegen, mit Vergrößerung der zeitlichen Abstände an. Die Werte der mittleren Oberflächenrauheit für eine Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ blieben allerdings für alle zeitlichen Abstände auf annähernd einem Niveau. Im Vergleich mit den S_a -Werten bei einer gleichmäßigen Energieverteilung sind diese jedoch geringer, als jene nach ansteigendem Muster. Für die hohen Gesamtfluenzen von $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$ nehmen die Kurvenverläufe jedoch eine deutlich steilere Neigung ein (Abbildung 34).

Eine mögliche Begründung für das Ansteigen der Oberflächenrauheit kann auch hierbei durch die erhöhten LIPSS-Tiefen und der stärkeren Ausprägung von CLP-Strukturen bei einer Erhöhung des Zeitabstandes erfolgen. Die Einflüsse durch den Inkubationseffekt und die Akkumulation von Restwärme lassen ebenso eine Herleitung zu.

Die Energieverteilung nach absteigendem Muster führte für alle Gesamtfluenzen des gewählten Parameterbereichs bei niedrigen Zeitabständen zu einem deutlichen Anstieg der S_a -Werte. In Richtung eines zeitlichen Intra-abstandes von 87,5 ns werden die ermittelten Werte für die vorgenommenen Energieverteilungen untereinander vergleichbar. Für die Gesamtfluenzen von 1,5 J/cm², 3,0 J/cm² und 6,0 J/cm² verlaufen die ermittelten Werte der mittleren Oberflächenrauheit in Abhängigkeit zur Gesamtfluenz über alle zeitlichen Pulsabstände auf einem Niveau und sind damit tendenziell unabhängig vom zeitlichen Intra-Burstabstand (Abbildung 35).

Die hierbei hervorgerufene Änderung der S_a -Werte kann über die Energieverteilung der Pulse erklärt werden. Der erste Puls wird mit etwa einem Dreiviertel der gesamten zur Verfügung stehenden Energie in das Material eingekoppelt. Die Energie ist dabei so hoch, dass es zu einer Phasenexplosion kommt. Der so erzeugte Oberflächenaufbruch führt zu einer sehr unebenen Topologie, die vom energetisch viel schwächeren zweiten Puls nicht durch die Bildung einer Schmelze geglättet werden kann.

Bei einem Vergleich der erreichbaren Oberflächenrauheit zwischen dem Einzelpulsmodus und dem Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen kann innerhalb des gewählten Parameterbereichs von 1,5 J/cm² und 8,0 J/cm² festgehalten werden, dass eine deutliche Verringerung der S_a -Werte durch Verwendung des Doppelpulsmodus durch die Variation der zeitlichen Intra-Burstabstände realisiert werden kann. Die Verwendung des Doppelpulsmodus mit ansteigender Energieverteilung und einer Gesamtfluenz von 3 J/cm² kann bei einem zeitlichen Intra-Burstabstand von 12,5 ns zu einer mittleren Oberflächenrauheit von 342 nm führen. Der ermittelte S_a -Wert ist damit etwa vierfach geringer, als der im Einzelpulsmodus mit gleicher Fluenz erreichte Wert von 1323 nm.

5.2.2 Multipulse

Burst-Modus (N=3) mit einer Gesamtfluenz von 6 J/cm²

Abtragsvolumen und Abtragseffizienzen

Die ermittelten Abtragsvolumina und -effizienzen bei der Verwendung des Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts bei einer Gesamtfluenz von 6,0 J/cm² in Abhängigkeit vom zeitlichen Intra-Burstabstand beginnend mit 12,5 ns und endend mit 37,5 ns werden für die drei gewählten Energieverteilung in der Abbildung 37 (gleichmäßig), der Abbildung 38 (ansteigend) und der Abbildung 39 (absteigend) dargestellt.

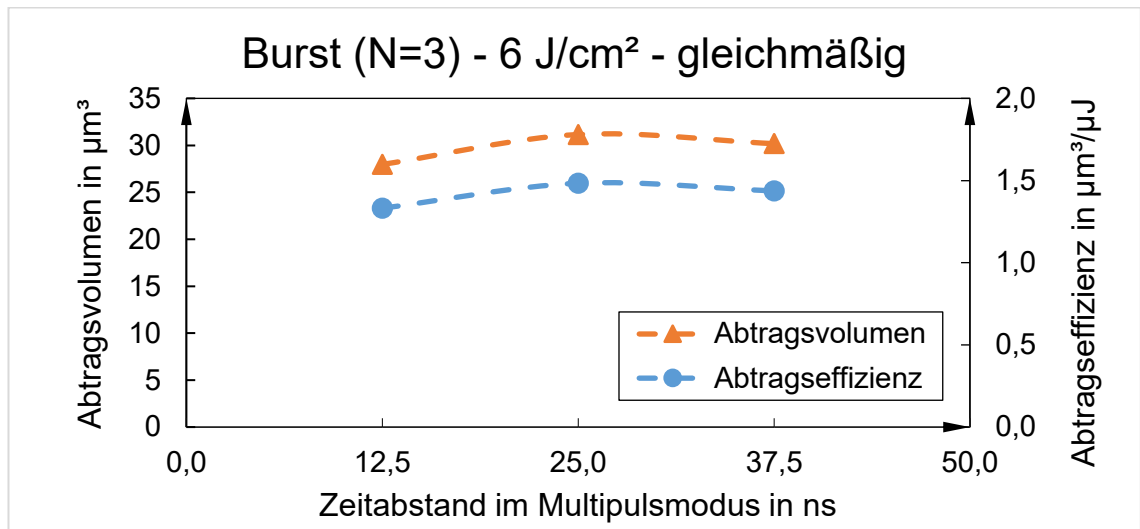


Abbildung 37: Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

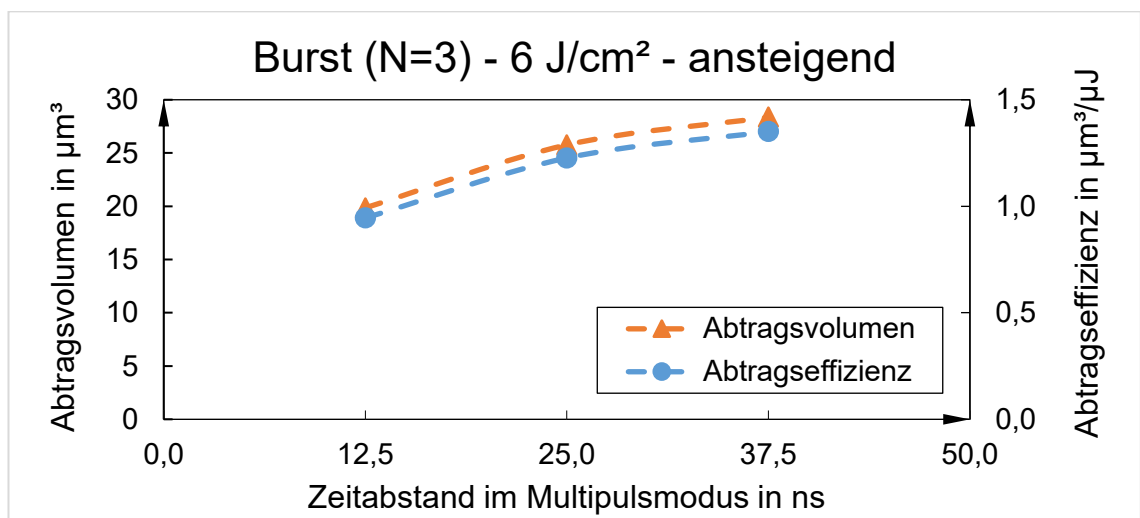


Abbildung 38: Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte ansteigend.

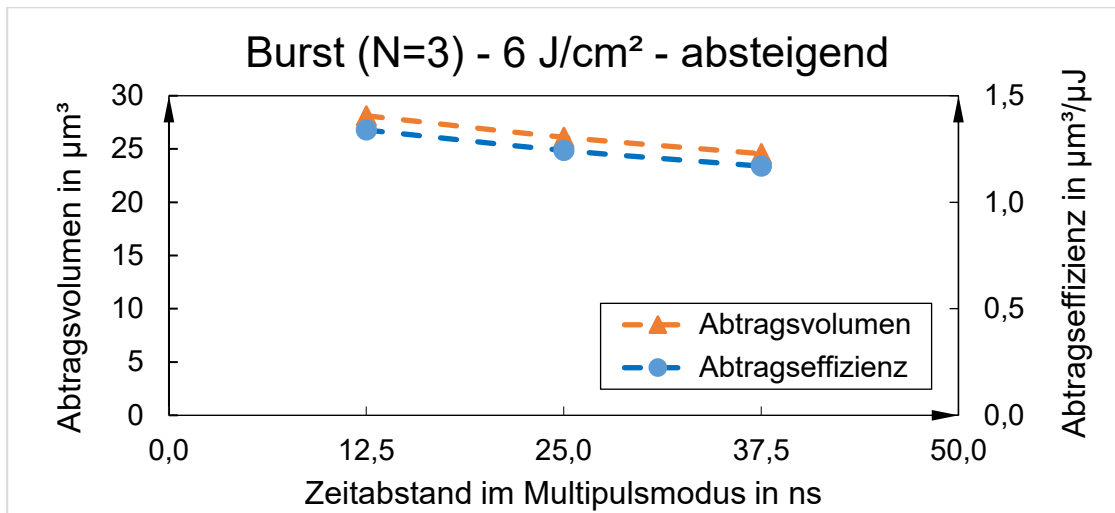


Abbildung 39: Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte absteigend.

Dabei wird ersichtlich, dass eine Vergrößerung der zeitlichen Intra-Burstabstände bei einer unterschiedlichen Energieverteilung zu verschiedenen Resultaten führte. Bei einer gleichmäßigen Energieverteilung konnte mit dem geringsten zeitlichen Intra-Burstabstand von $12,5 \text{ ns}$ ein Abtragsvolumen von ca. $28 \mu\text{m}^3$ und für den größten zeitlichen Abstand von $37,5 \text{ ns}$ ein Volumen von ca. $30 \mu\text{m}^3$ ermittelt werden. Das realisierbare Abtragsvolumen ist demnach bei einer gleichmäßigen Energieverteilung abhängig vom zeitlichen Intra-Burstabstand innerhalb des gewählten Parameterbereichs. Das Abtragsverhalten kann wie folgt erklärt werden: Die Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 teilt sich hierbei auf die drei Pulse innerhalb des Bursts mit jeweils 2 J/cm^2 auf. Jeder Puls besitzt damit mehr Energie, als für die Ablation notwendig ist. Die durch den ersten Puls hervorgerufene Dichte der Ablationswolke ist so hoch, dass ein Großteil der Strahlungsenergie des zweiten Pulses absorbiert wird. Infolge der Wechselwirkung des zweiten Pulses mit der Ablationswolke kommt es zu einer Ausdünnung der Wolke und einer Wiederablagerung bereits abgetragener Materialteilchen. Die Absorption des dritten Pulses durch die Ablationswolke ist nun verringert und ein größerer Teil der Strahlungsenergie wird in die Materialoberfläche eingekoppelt. Für eine ansteigende bzw. absteigende Energieverteilung lässt sich jedoch ein anderes Verhalten erkennen. Die Vergrößerung der zeitlichen Intra-Burstabstände mit ansteigender Energieverteilung führte zu einer Erhöhung des Abtragsvolumens von ca. $20 \mu\text{m}^3$ auf $29 \mu\text{m}^3$.

Anhand wie in Kapitel 3.5 geschlussver eine absteigende Verteilung zu einer Verringerung des Abtragsvolumens von $28 \mu\text{m}^3$ auf $25 \mu\text{m}^3$.

Das Verhalten bei einer ansteigenden Energieverteilung könnte durch die mit jedem Puls stärker werdende Wechselwirkung mit der Ablationswolke erklärt werden. Jeder Folgepuls besitzt mehr Energie als der Vorangegangene. Der mit mehr Energie versehene zweite Puls trifft demnach auf bereits ablatierte Teilchen und wird teilweise absorbiert. Bei einem entsprechend kurzen zeitlichen Intra-Burstabstand ist die Expansion der hierbei durch den ersten Puls erzeugten Ablationswolke kaum vorangeschritten. Der zweite Puls führt folglich zu einer Ausdünnung der Ablationswolke und verursacht gleichzeitig eine Wiederablagerung von zuvor ablatierten Teilchen. Der energiereichste dritte Puls kann durch die vom zweiten Puls hervorgerufene Ausdünnung der Ablationswolke unter einer geringeren Abschirmung mit der Materialoberfläche wechselwirken. Die durch den zweiten Puls erzeugte Wiederablagerung muss jedoch erneut zunächst erst einmal abgetragen werden. Das Ergebnis sind geringere Abtragsvolumen als bei einer gleichmäßigen Energieverteilung. Durch eine Vergrößerung des zeitlichen Intra-Burstabstandes und der damit einhergehenden stärker ausgeprägten Expansion der Ablationswolke zwischen den Pulsen kann ein Anstieg des Abtragsvolumens ermittelt werden. Die Abtrags-effizienzen verlaufen entsprechend linear zu den abgetragenen Volumen.

Die auftretenden Phänomene sind allerdings noch Gegenstand der aktuellen Forschung und müssen durch weitere Studien besser belegt werden.

Beitrag des zweiten und dritten Pulses zum Gesamt-Abtragsvolumen

Die Ermittlung des Abtragsverhalten pro Puls bei der Nutzung von drei Pulsen innerhalb eines Bursts mit einer Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ wurde aufgrund der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Einzelpulsmodus und Doppelpulsmodus nur für eine gleichmäßige Energieverteilung vorgenommen. Die Berechnung der Abtragsvolumen erfolgte gemäß der im Kapitel 4.4 – Analysemethoden beschriebenen Gleichungen.

In der Darstellung der Abbildung 40 ist ersichtlich, dass mit jedem weiteren Puls eine Erhöhung des Abtragsvolumens pro Puls ermittelt werden konnte. Die Pulse resultierten durch die gleichmäßige Verteilung der Energie jeweils in einer Fluenz von etwa 2 J/cm^2 . Der Verlauf des abgetragenen Volumens in Abhängigkeit zum zeitlichen Intra-Burstabstand lässt sich für den zweiten Puls innerhalb des Bursts erneut mit der Entstehung einer Ablationswolke schlussfolgern. Das Verhalten ist demnach ähnlich dem des zweiten Pulses bei einer Nutzung des Doppelpulsmodus mit einer Gesamtfluenz von 4 J/cm^2 . Die Expansion der Ablationswolke in Abhängigkeit vom Intra-Burstabstand führt folglich auch bei der Nutzung des Multipulsmodus mit drei Pulsen innerhalb des

Bursts zu einer verringerten Abschirmung des zweiten Pulses. Das Verhalten des dritten Pulses mit einem zeitlichen Intra-Burstabstand von 25,0 ns erfolgt gemäß der Erwartung, dass durch den zweiten Puls eine Ausdünnung der Ablationswolke erfolgt ist (Abbildung 50). Im Gegensatz dazu zeigt sich ein ganz anderes Verhalten für die zeitlichen Abstände von 12,5 ns und 37,5 ns.

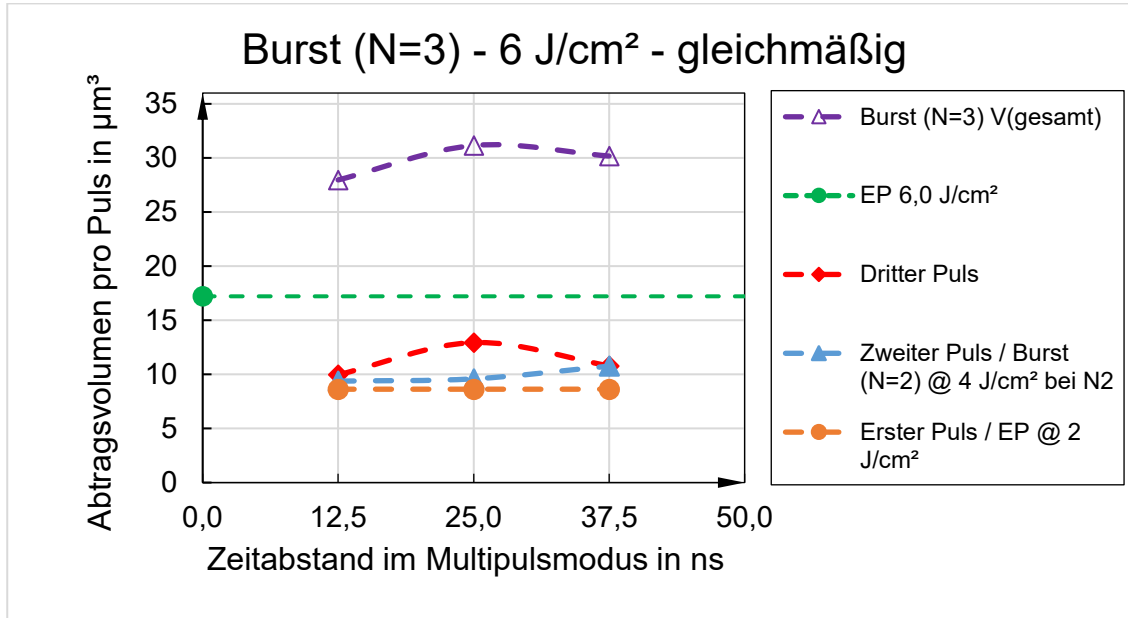


Abbildung 40: Darstellung der im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts abgetragenen Volumenanteils der einzelnen Pulse bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm² mit einem Vergleich zum Volumenabtrag des im Einzelpulsmodus mit einer Fluenz von 6 J/cm². Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

Rauheiten

Beginnend mit einem Intra-Burstabstand von 12,5 ns bei einer Gesamtfluenz von 6,0 J/cm² waren die S_a -Werte für alle vorgenommenen Energieverteilungen am geringsten und stiegen mit Vergrößerung der zeitlichen Intra-Burstabstände an.

Die Werte der mittleren Oberflächenrauheit führten bei einer gleichmäßigen und ansteigenden Energieverteilung zu ähnlichem Kurvenverläufen, wobei die größte Differenz von 500 nm einem zeitlichen Intra-Burstabstand von 25 ns erzeugt wurde (Abbildung 41).

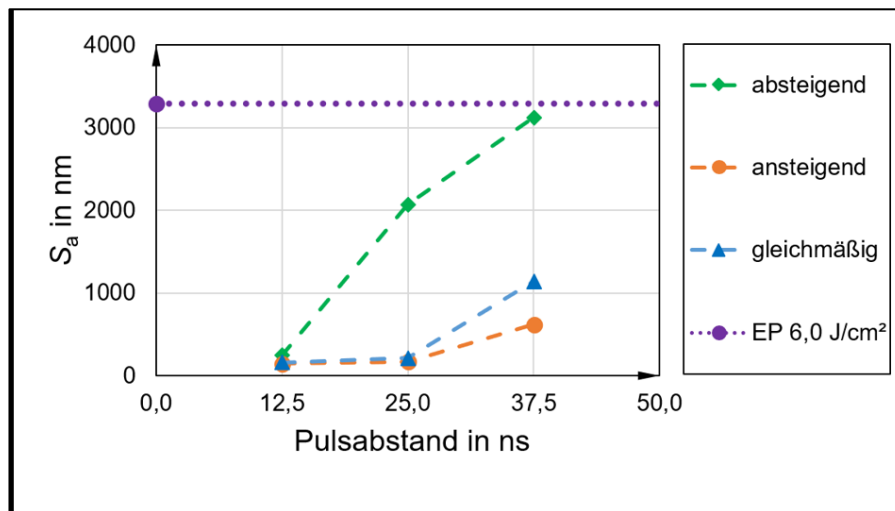


Abbildung 41: Darstellung der im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung verschiedener Energieverteilungen (gleichmäßig, ansteigend und absteigend.)

Für den kürzesten zeitlichen Abstände des gewählten Parameterbereichs von 12,5 ns wurden mit 150 nm für beide Energieverteilungen (gleichmäßig, ansteigend) nahezu gleiche Werte ermittelt (ca 150 ns). Im Vergleich dazu, führte eine absteigende Energieverteilung bei einem zeitlichen Abstand der Pulse von 12,5 ns zu dem geringfügig höchsten Wert von 248 nm. Der Kurvenverlauf der absteigenden Energieverteilung wird im Gegensatz hierzu mit der Vergrößerung der zeitlichen Abstände bis auf einen Wert von 37,5 ns deutlich steiler. Dabei konnte für die mittlere Oberflächenrauheit der höchste Wert mit 3128 nm ermittelt werden. In der Abbildung 41 wird weiter ersichtlich, dass eine resultierende mittlere Oberflächenrauheit um den Faktor 20 bei gleichzeitiger Erhöhung der Effizienz um bis zu 80 % erzeugt werden kann.

Eine mögliche Begründung für das Ansteigen der Oberflächenrauheit kann auch hierbei durch die erhöhten LIPSS-Tiefen und der stärkeren Ausprägung von CLP-Strukturen bei einer Erhöhung des Zeitabstandes erfolgen und wird mit den REM-Aufnahmen der erzeugten Strukturbilder in Abbildung 42 dargestellt. Die Einflüsse durch die hervorgerufene Schmelzdynamik infolge der Akkumulation von Restwärme lassen ebenso eine Herleitung zu.

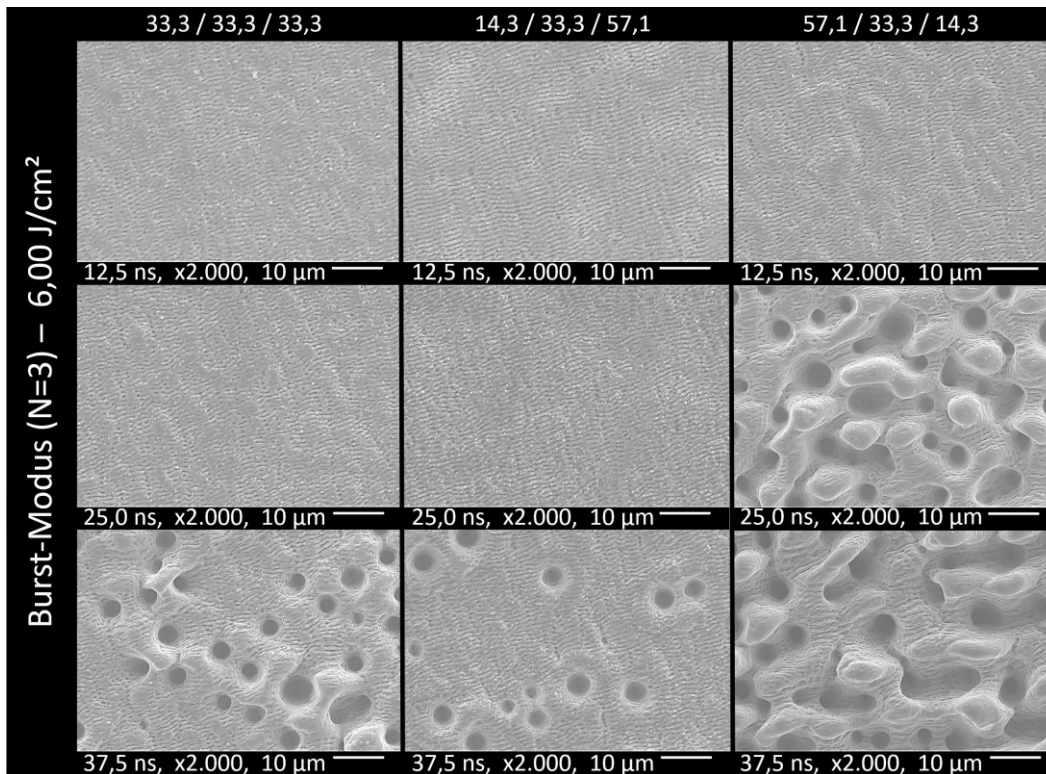


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit drei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $6,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes von $12,5 \text{ ns p. P.}$ bis $37,5 \text{ ns p. P.}$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig, ansteigend und absteigend gemäß der beschriebenen Gesamtverteilung.

Burst-Modus (N=4) mit einer Gesamtfluenz von 8 J/cm^2

Abtragsvolumen und Abtragseffizienzen

Die ermittelten Abtragsvolumina und -effizienzen bei der Verwendung des Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts bei einer Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ in Abhängigkeit vom zeitlichen Intra-Burstabstand beginnend mit $12,5 \text{ ns}$ und endend mit $25,0 \text{ ns}$ werden für die drei gewählten Energieverteilung in der Abbildung 43 (gleichmäßig), der Abbildung 44 (ansteigend) und der Abbildung 45 (absteigend) dargestellt.

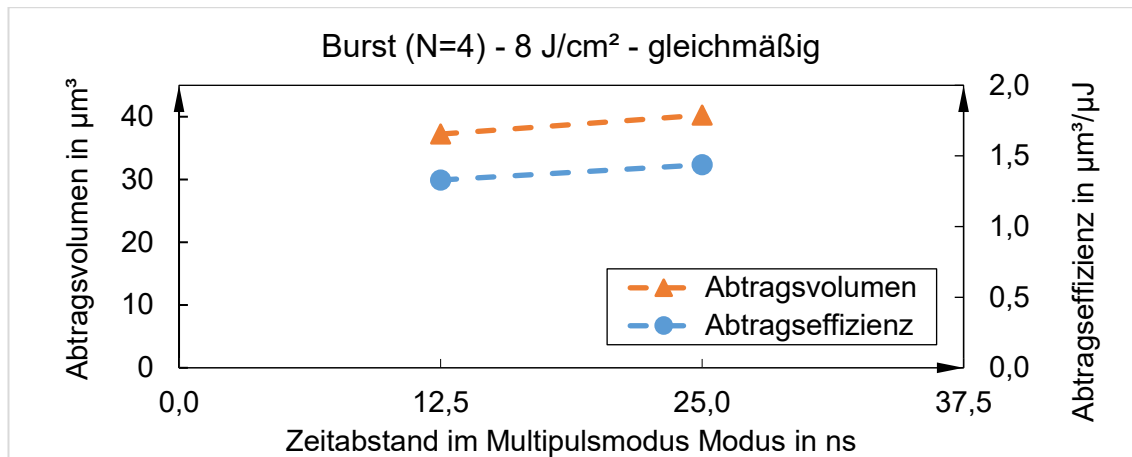


Abbildung 43: Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

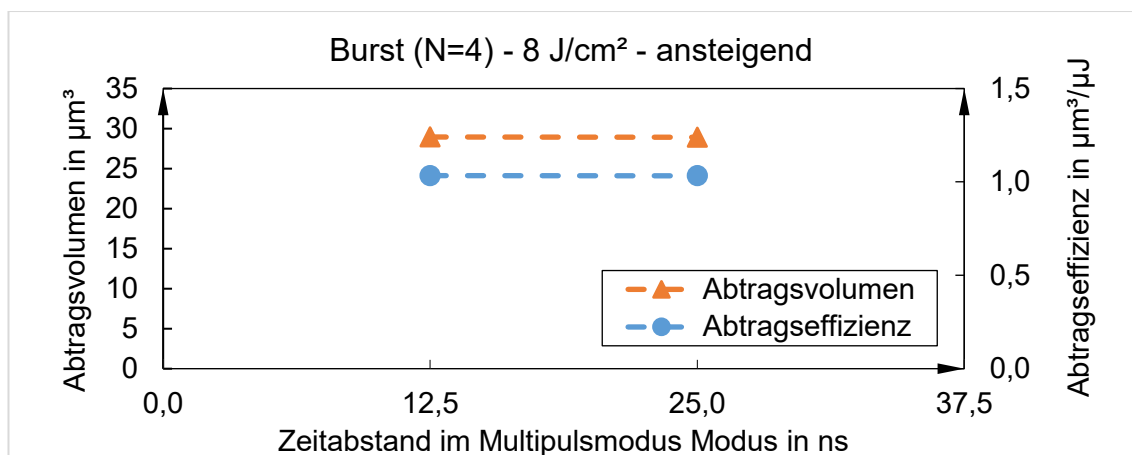


Abbildung 44: Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte ansteigend.

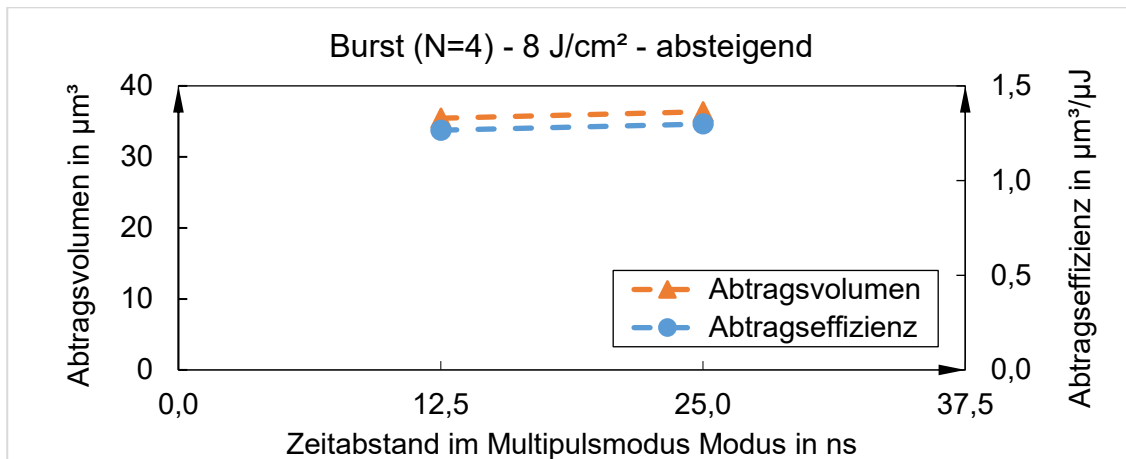


Abbildung 45: Darstellung des Abtragsvolumens (linke Ordinate) und der Abtragseffizienz (rechte Ordinate) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts bei der Verwendung ultrakurzer Pulse im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts für eine Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte absteigend.

Die Abbildungen lassen erkennen, dass die erzeugbaren Abtragsvolumen in Abhängigkeit vom zeitlichen Intra-Burstabstand bei der Nutzung des Multipulsmodus mit $N=4$ zu einem Unterschied von etwa 8 % führen. Einen Einfluss durch eine unterschiedlichen Energieverteilung kann indes sehr wohl auf die hervorgerufenen Abtragsvolumen genommen werden. Die Abtragsvolumen wurde bei einer gleichmäßigen Energieverteilung von bis zu $40,25 \mu\text{m}^3$, bei einer ansteigenden Verteilung von bis zu $28,91 \mu\text{m}^3$ und bei einer absteigenden Verteilung von bis zu $36,36 \mu\text{m}^3$ ermittelt. Eine ungleichmäßige Energieverteilung führte folglich zu einer Verringerung des Abtragsvolumens, ähnlich dem Multipulsmodus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts. Die entstandenen Differenzen sind allerdings deutlich größer. Eine Erklärung für das Verhalten kann hierbei in Anhand des Kapitel 3.5 – Ablation von Metall mit Multipulsen für eine gerade Anzahl an Pulsen innerhalb eines Bursts erfolgen.

Beitrag des zweiten, dritten und vierten Pulses zum Gesamt-Abtragsvolumen

Die Ermittlung des Abtragsverhalten pro Puls bei der Nutzung von vier Pulsen innerhalb eines Bursts mit einer Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ wurde auch hier für eine günstigere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Einzelpulsmodus und Doppelpulsmodus nur für eine gleichmäßige Energieverteilung vorgenommen. Die Berechnung der Abtragsvolumen erfolgte erneut gemäß der im Kapitel 4.4 – Analysemethoden beschriebenen Gleichungen.

In der Darstellung der Abbildung 46 ist ersichtlich, dass mit jedem ungeradzahligen Puls weniger Volumen abgetragen werden konnte, als mit den Geradzahligen. Die Pulse resultierten durch die gleichmäßige Verteilung der Energie ganz ähnlich zum Burst-Modus

mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts jeweils mit einer Fluenz von etwa 2 J/cm^2 . Die ermittelten Werte der Abtragsvolumen in Abhängigkeit der Position des Pulses innerhalb des Bursts kann wieder durch die Erzeugung und Abschirmung einer Ablationswolke erfolgen. Eine ungeradzahlige Position des Pulses führte zu einem entsprechend höheren Abtrag, als die ungeradzahlige Position vor diesem (Abbildung 50).

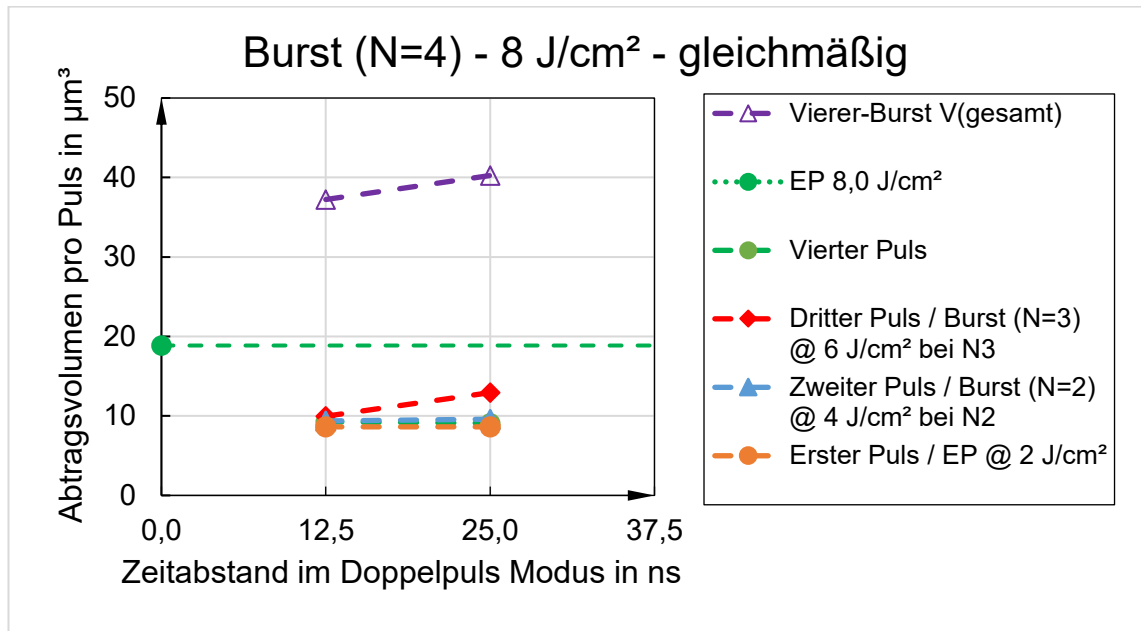


Abbildung 46: Darstellung der im Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts abgetragenen Volumenanteils der einzelnen Pulse bei einer Gesamtfluenz von 8 J/cm^2 mit einem Vergleich zum Volumenabtrag des im Einzelpulsmodus mit einer Fluenz von 8 J/cm^2 . Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

Rauheiten

Beginnend mit einem Intra-Burstabstand von $12,5 \text{ ns}$ und einer Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ war der S_a -Wert mit 156 nm bei einer absteigenden Energieverteilungen im Vergleich zu den Werten der gleichmäßigen Energieverteilung mit 200 nm und ansteigenden Energieverteilung mit 210 nm bei einem zeitlichen Intra-Burstabstand am geringsten. Bei der Vergrößerung des zeitlichen Intra-Burstabstandes konnte jedoch ein deutlicher Anstieg 307 nm ermittelt werden. Im Gegensatz dazu konnte mit der Vergrößerung des zeitlichen Abstandes bei einer ansteigenden Energieverteilung die mittlere Oberflächenrauheit von 219 nm auf 170 nm verringert werden. Der S_a -Wert bei einer gleichmäßigen Verteilung der Energie war hingegen nahezu unabhängig vom zeitlichen Intra-Burstabstand. Die Werte lagen hierbei stets im mittleren Bereich zwischen der ansteigenden bzw. absteigenden Energieverteilung (Abbildung 47).

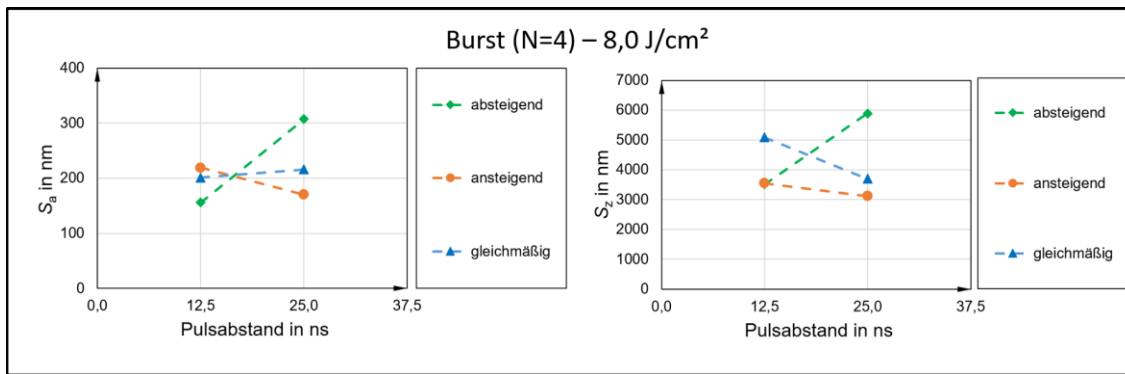


Abbildung 47: Darstellung der im Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von 8,0 J/cm² unter Verwendung verschiedener Energieverteilungen (gleichmäßig, ansteigend und absteigend.)

Eine Erklärung für die sehr geringen ermittelten Werte der mittleren Oberflächenrauheit kann durch die Schmelzdynamik infolge der Wärmeakkumulation und des Aufschmelzens von CLP-Strukturen bzw. von wiederabgelagerten bereits schon einmal ablatierten Teilchen erfolgen (Abbildung 48 und Abbildung 49).

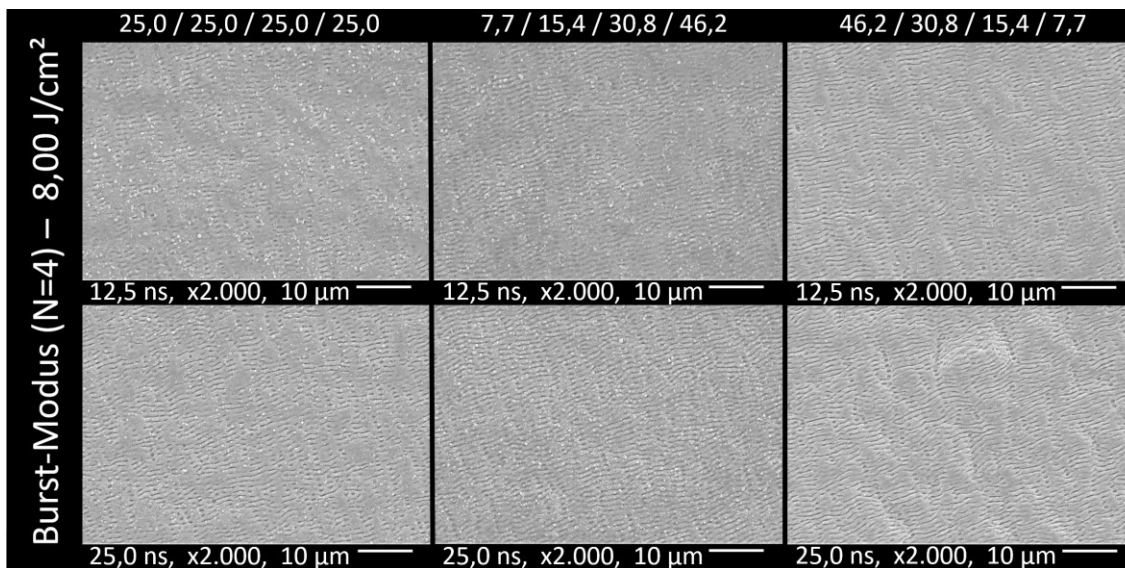


Abbildung 48: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit drei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von 8,00 J/cm² und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes von 12,5 ns p. P. bis 25,0 ns p. P. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig, ansteigend und absteigend nach den prozentual beschriebenen Aufteilungen.

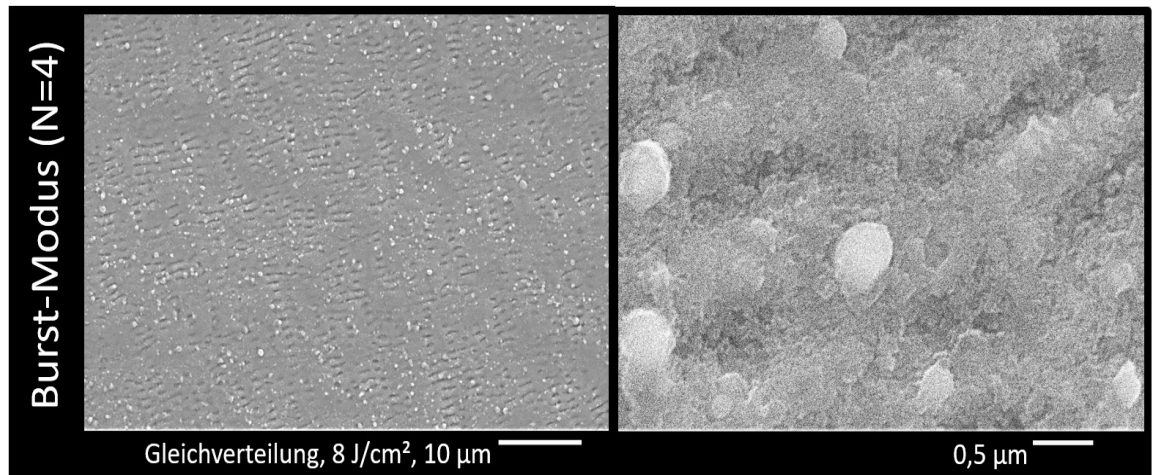


Abbildung 49: Tropfenförmige Wiederablagerung von ablatiertem Material durch die Wechselwirkung eines Folgepulses mit einer gegebenen Ablationswolke.

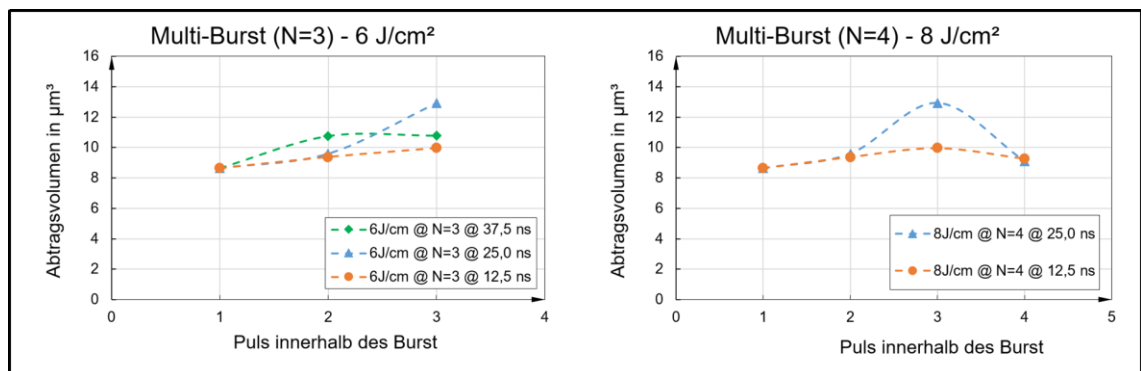


Abbildung 50: Darstellung der Abtragsverhalten der durch einen Puls im Burst erzeugten Abtragsvolumen in Abhängigkeit zur Pulsposition innerhalb eines Bursts bei einer Gesamtfluenz von 6 J/cm^2 ($N=3$) (links) und von 8 J/cm^2 ($N=4$) im Multi-Burst-Modus.

5.3 Vergleich

Abtragsvolumen und Abtragseffizienzen

Bei einem Vergleich der ermittelten Abtragsvolumen bzw. -effizienzen für den Einzel-, Doppel- und Multipulsmodus mit ultrakurzen Pulsen und vergleichbaren Fluenzen wird ersichtlich, dass mit der Nutzung von Bursts mehr Material abgetragen werden kann und gleichsam eine Erhöhung der Effizienz erfolgt. Dieses Verhalten wird bei der Gegenüberstellung des Kurvenverlaufs zwischen dem Doppelpulsmodus und dem Burst-Modus mit drei bzw. vier Pulsen besonders deutlich (Abbildung 51 und Abbildung 52).

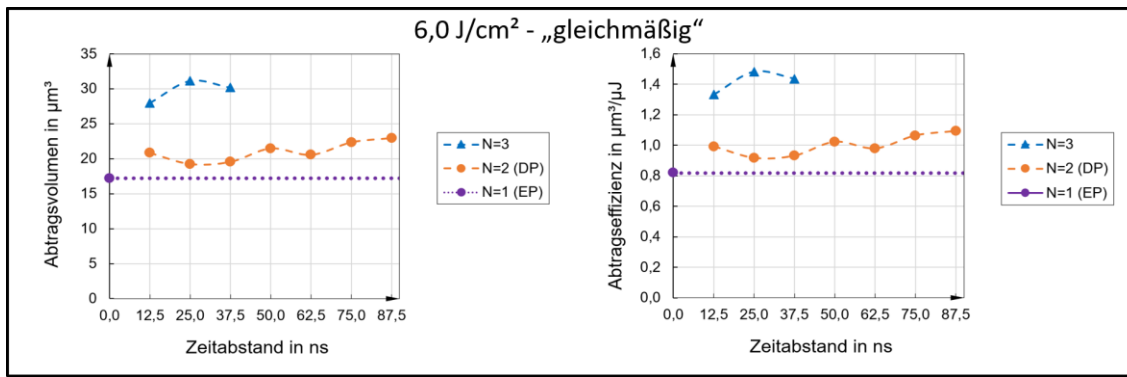


Abbildung 51: Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls ($N=3$) erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

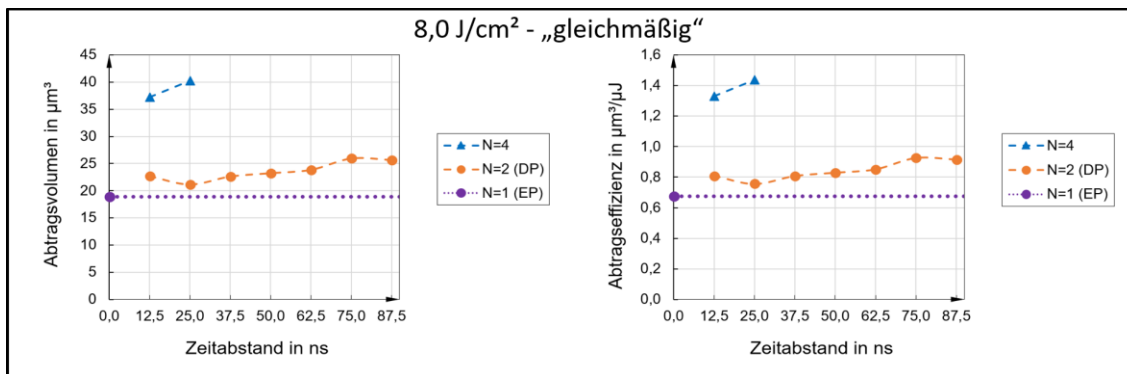


Abbildung 52: Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls ($N=4$) erzeugten Abtragsvolumen (links) und Abtragseffizienzen (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

Die Erhöhung des Abtragsvolumens und der Abtragseffizienz bei der Nutzung von Burst lassen sich erneut anhand der Wärmeakkumulation und der Wechselwirkung der einzelnen Pulse im Burst mit den herausgelösten Teilchen erklären.

Rauheiten

Bei einem Vergleich der ermittelten Oberflächenrauheiten für den Einzel-, Doppel- und Multipulsmodus mit ultrakurzen Pulsen und vergleichbaren Fluenzen wird ersichtlich, dass mit der Nutzung von Bursts deutlich geringere Rauheitswerte erreicht werden können. Für höhere Gesamtfluenzen ab $6,0 \text{ J/cm}^2$ scheint diese Annahme mit einer Vergrößerung des zeitlichen Intra-Burstabstandes nur bedingt zutreffen. Mit den Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 wird ersichtlich, dass ein Anstieg der Gesamtfluenz im Doppelpulsmodus zu einer Annäherung bzw. Überschreitung der mittleren Oberflächenrauheitswerte des Einzelpulsmodus führt. Ebenso nimmt auch die

energetische Verteilung der Pulse innerhalb eines Bursts Einfluss auf die erreichbare Oberflächenrauheit. Eine gleichmäßige (50 / 50) bzw. ansteigende (25 / 75) Energieverteilung führte in Abhängigkeit vom zeitlichen Intra-Burstabstand zu einem Anstieg der S_z -Werte bis hin zu einem möglicherweise festen Wert. Die absteigende Energieverteilung zeigte mit einer geringen Abweichung bei einer Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ hingegen nur eine vernachlässigbar geringe Abhängigkeit von den gewählten zeitlichen Abständen der Pulse innerhalb eines Bursts. Das dabei hervorgerufene Oberflächenrauheitsniveau überschreitet zunächst die bei einer gleichmäßigen bzw. ansteigenden Energieverteilung erreichten Werte im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis ca. $37,5 \text{ ns}$, verläuft jedoch mit Vergrößerung der zeitlichen Intra-Burstabstände zwischen diesen. Für die höheren Gesamtfluenzen des gewählten Parameterbereichs von $6,0 \text{ J/cm}^2$ bzw. $8,0 \text{ J/cm}^2$ konnten mit einer absteigenden Energieverteilung ab einem zeitlichen Abstand von $62,5 \text{ ns}$ bzw. $75,0 \text{ ns}$ die geringsten mittleren Oberflächenrauheitswerte ermittelt werden.

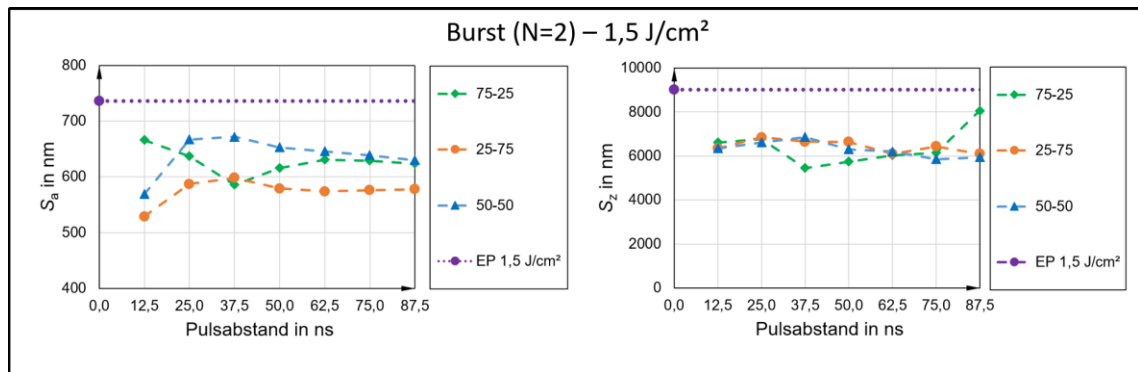


Abbildung 53: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a und dem Spitzenwert S_z in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ für verschiedene Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)).

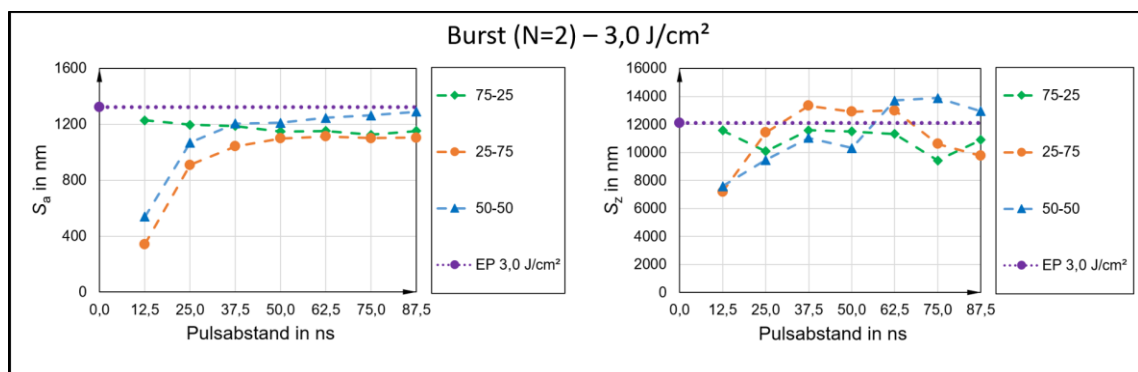


Abbildung 54: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ für

verschiedene Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)).

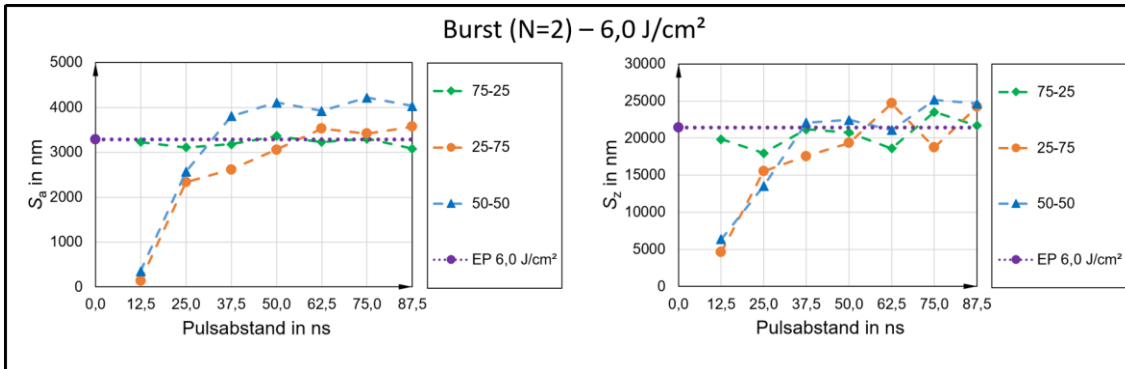


Abbildung 55: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ für verschiedene Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)).

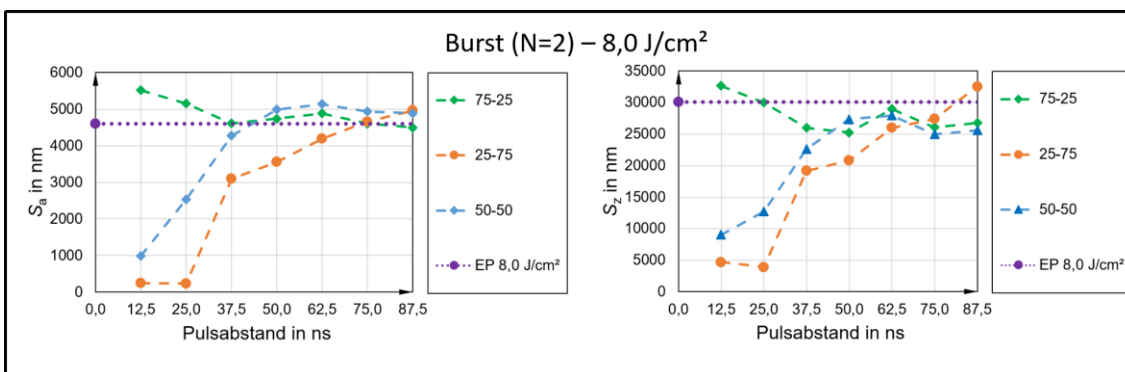


Abbildung 56: Darstellung der im Doppelpulsmodus erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts mit zwei Pulsen für die Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung verschiedener Energieverteilungen (gleichmäßig (50-50), ansteigend (25-75) und absteigend (75-25)).

Bei einem Vergleich der ermittelten mittleren Oberflächenrauheit in Abhängigkeit zur Pulsanzahl innerhalb eines Bursts bei gleicher Gesamtfluenz, kann festgestellt werden, dass die Erhöhung der Pulsanzahl zu einer Verringerung der Oberflächenrauheitwerte geführt hat.

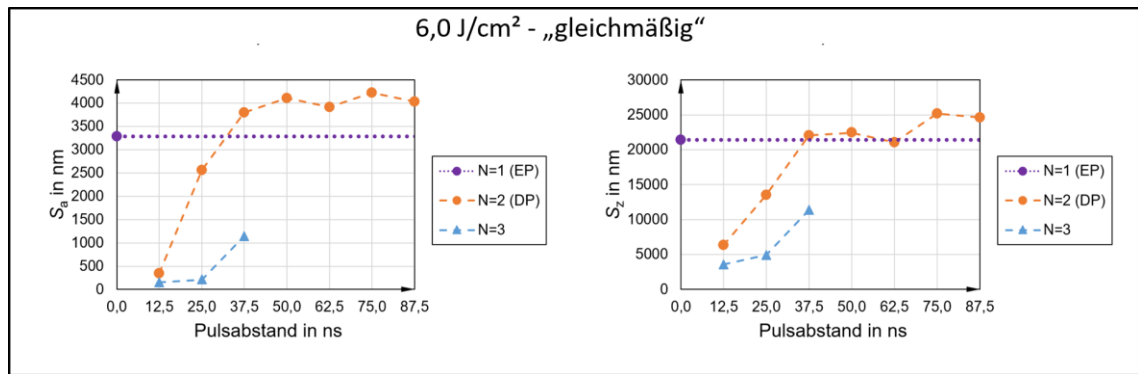


Abbildung 57: Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls (N=4) erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

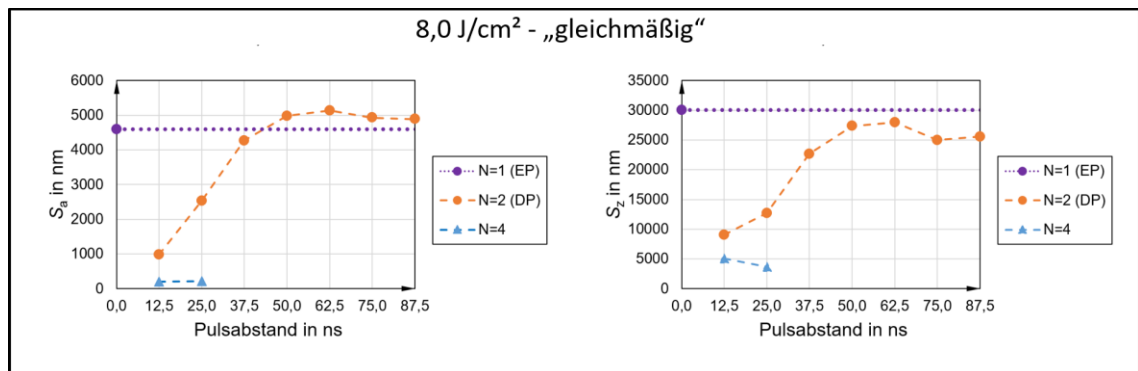


Abbildung 58: Vergleichende Darstellung der mit den Modi Einzelpuls, Doppelpuls und Multipuls (N=4) erzeugten mittleren Oberflächenrauheit S_a (links) und dem Spitzenwert S_z (rechts) in Abhängigkeit vom zeitlichen Pulsabstand innerhalb eines Bursts für die Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig.

In Abhängigkeit zum zeitlichen Intra-Burstabstand können im Vergleich zum Einzelpulsmodus teils deutlich geringere Werte erreicht werden. Eine Vergrößerung des zeitlichen Abstandes innerhalb des gewählten Parameterbereichs kann bei der Nutzung des Doppelpulsmodus allerdings zu einer Überschreitung der im Einzelpulsmodus erreichbaren mittleren Oberflächenrauheit führen. Besonders auffällig ist die erreichte Differenz zwischen den Werten des Einzelpulsmodus und dem Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb des Bursts.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Materialabtrag auf Edelstahl bei der Nutzung ultrakurzer Pulse im Einzelpuls-, Doppelpuls- und Multipulsmodus untersucht. Als Laserstrahlquelle wurde der Pikosekundenlaser FuegoTM des Herstellers Time-Bandwidth[®]-Products mit emittierter Wellenlänge von 1064 nm und einer Pulsdauer von 10 ps verwendet. Für die Ermittlung der Abtragsvolumen und -effizienzen in Abhängigkeit von der Fluenz (von 0,75 J/cm² bis 8,0 J/cm²), der Anzahl an Pulsen (eins bis vier), zeitlichen Intra-Burstabstände (von 12,5 ns bis 87,5 ns) und Energieverteilung je Puls (gleichmäßig, an- und absteigend) wurden Flächenabträge auf einer Edelstahlprobe unter Verwendung der genannten Modi erzeugt, vermessen und miteinander verglichen.

Für den Einzelpulsmodus kann geschlussfolgert werden, dass eine Steigerung der Fluenz nicht linear zu einem höheren Abtragsvolumen führt, sodass die Abtragseffizienz mit steigender Fluenz abnimmt. Die mittleren Oberflächenrauheiten der im Multipulsmodus erzeugten Strukturböden haben sich mit Erhöhung der Pulsanzahl im Burst mit vergleichbaren Fluenzen stetig reduziert. Dies lässt sich gegebenenfalls Anhand entstandener CLP erklären, die mit dem Anstieg der Pulsenergie aufgrund von optischen und thermischen Effekten stärker ausgeprägt werden.

Die ermittelten Ergebnisse des Doppelpulsmodus lassen erkennen, dass sich die Erhöhung der Pulsenergie und die damit verbundene Steigerung der Fluenz positiv auf den Materialabtrag auswirkt. Eine Erhöhung der zeitlichen Intra-Burstabstände führte bei einer Gesamtfluenz von 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm², ebenfalls zu einer Steigerung des Abtragsvolumens und dementsprechend zu einer Steigerung der Abtragseffizienz. Erklären lässt sich die Erhöhung des Abtragsvolumens anhand der Verringerung der Dichte der Ablationswolke bei einer Erhöhung des zeitlichen Pulsabstandes. Der zweite Puls kann mehr seiner Pulsenergie in die Materialoberfläche einbringen und wird von dem ablatierten Teilchen weniger abgeschirmt. Bei der Betrachtung des abgetragenen Volumenanteils pro Puls am Gesamtvolumen wurde demonstriert, dass der zweite Puls bei einer Gesamtfluenz von 6,0 J/cm² und 8,0 J/cm² mehr Material als der erste Puls abträgt, was durch eine modifizierte Materialoberfläche oder einer Akkumulation der Restwärme des ersten Pulses zurückzuführen sein kann. Die hierbei erzeugte Dichte der Ablationswolke ist sehr hoch und die Abschirmung der Laserstrahlung des zweiten Pulses entsprechend sehr stark, sodass bei geringen Zeitabständen im Vergleich zum Einzelpulsmodus weniger Material abgetragen wird. Bei langen zeitlichen Intra-Burstabständen nimmt diese Abschirmung ab.

Durch eine Änderung der Energieverteilung nach absteigendem Muster konnte für eine Gesamtfluenz $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$ eine Erhöhung des Abtragsvolumens und folglich der Abtragseffizienz erreicht werden. Für geringere Gesamtfluenzen wurde mit einer absteigenden Energieverteilung ein gegenteiliger Effekt bewirkt. Die ermittelten Werte der mittleren Oberflächenrauheit in Abhängigkeit zur Gesamtfluenz für die Gesamtfluenzen von $1,5 \text{ J/cm}^2$, $3,0 \text{ J/cm}^2$ und $6,0 \text{ J/cm}^2$ verlaufen über alle zeitlichen Pulsabstände auf einem Niveau und sind damit tendenziell unabhängig vom zeitlichen Intra-Burstabstand.

Bezüglich der ermittelten Ergebnisse des Multipulsmodus kann geschlussfolgert werden, dass die Effekte der Abschirmung durch bereits ablatierte Teilchen und der der Wärmeakkumulation bei geraden bzw. ungeraden Pulsanzahlen innerhalb eines Bursts unterschiedlich Einfluss nehmen. Demnach erfährt jeder zweite Puls in der Regel eine Abschirmung und dient der Ausdünnung der Dichte der Ablationswolke. Darauf folgende Pulse werden entsprechend geringer von der Ablationswolke absorbiert und ein größerer Anteil der Strahlungsenergie kann in die Materialoberfläche eingekoppelt werden. Das Verhalten scheint für Edelstahl nicht vollständig zu zutreffen. Mit der Nutzung des Multipulsmodus können jedoch im Vergleich zum Einzelpulsmodus mit einer vergleichbaren Fluenz von 6 J/cm^2 bzw. 8 J/cm^2 deutlich höhere Abtragsvolumen und deutlich geringere Oberflächenrauheiten erreicht werden.

In Anlehnung an die Motivation und Zielstellung dieser Arbeit wird deutlich, dass die Ermittlung optimaler Verfahrensparameter auf die laserinduzierte Bearbeitung essentiell sind und die Ergebnisse dieser Arbeit ein erster Schritt in eine weitere Versuchsanordnung sein können.

7 Literaturverzeichnis

- [1] J.D. Verhoeven, Stahl-Metallurgie für Einsteiger: Komplizierte Zusammenhänge verständlich erklärt, 1. Aufl. der dt. Ausg, Wieland, Bad Aibling, 2013.
- [2] J.R. Davis (Ed.), Stainless steels, 1. pr, ASM International, Materials Park, Ohio, 1994.
- [3] H.-H. Cloeren, Materialographische Präparationstechniken: Leitfaden für den Praktiker und Einsteiger Tipps & Tricks Vermeidung von Artefakten von der Probenentnahme bis zum fertigen Schliff Materialographie, Bauteilmaterialographie, Dünnschlifftechnik, Archäo-Materialographie, 1. Auflage, CTV Heinz-Hubert Cloeren, Niederkrüchten, 2014.
- [4] K. Andreas, Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen, Meisenbach GmbH Verlag, Bamberg, 2015.
- [5] H. Stüdemann, E. Lauterjung, R. Grube, Das Schleifen von rostbeständigem Stahl mit magnesitgebundenen Schleifsteinen und die Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch die Schleifwärme, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1980.
- [6] W. König, F. Klocke, Fertigungsverfahren 3: Abtragen und Generieren, 3., überarbeitete Auflage, Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [7] M. BLIEDTNER, LASERMATERIALBEARBEITUNG, CARL HANSER Verlag GMBH &, [Place of publication not identified], 2013.
- [8] Taschenbuch der Mathematik: [mit CD-ROM DeskTop Bronstein], 8., vollst. überarb. Aufl., Deutsch, Frankfurt, M., 2012.
- [9] J. Bliedtner, G. Gräfe, Optiktechnologie: Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele, 2., aktualisierte Aufl., C. Hanser; Fachbuchverlag Leipzig, München, op. 2010.
- [10] D.C. Giancoli, Physik, 4., aktualisierte Auflage, Pearson, Hallbergmoos, 2019.
- [11] R. Paschotta, Encyclopedia of Laser Physics and Technology, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [12] A. Ruf, Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern, Utz, München, 2004.
- [13] W.-Z. Lin, R.W. Schoenlein, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, Femtosecond absorption saturation studies of hot carriers in GaAs and AlGaAs, IEEE J. Quantum Electron. 24 (1988) 267–275.

-
- [14] H. Hügel, T. Graf, *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*, 2., neu bearbeitete Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [15] Y. Jee, M.F. Becker, R.M. Walser, Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces, *J. Opt. Soc. Am. B* 5 (1988) 648.
- [16] Yucheng Pan, *Untersuchungen zum Materialabtrag einer Nickel-Chrom-Legierung mittels Femtosekunden-Laserstrahlung*, Bachelorarbeit, Mittweida, 2016.
- [17] M.E. Povarnitsyn, V.B. Fokin, P.R. Levashov, T.E. Itina, Molecular dynamics simulation of subpicosecond double-pulse laser ablation of metals, *Phys. Rev. B* 92 (2015).
- [18] M.E. Povarnitsyn, T.E. Itina, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, Suppression of ablation in femtosecond double-pulse experiments, *Physical review letters* 103 (2009) 195002.
- [19] D.J. Förster, B. Jäggi, A. Michalowski, B. Neuenschwander, Review on Experimental and Theoretical Investigations of Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Metals with Burst Pulses, *Materials* (Basel, Switzerland) 14 (2021).
- [20] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, M. Schmid, V. Rouffiange, P.-E. Martin, Optimization of the volume ablation rate for metals at different laser pulse durations from ps to fs, in: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, San Francisco, California, USA, 2012, p. 824307.
- [21] D. Metzner, *Ablation von Material mit hochfrequenter ultrakurz gepulster Laserstrahlung*, Masterarbeit, Mittweida, 2018.
- [22] B. Jäggi, D.J. Förster, R. Weber, B. Neuenschwander, Residual heat during laser ablation of metals with bursts of ultra-short pulses, *Advanced Optical Technologies* 7 (2018) 175–182.
- [23] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, D.J. Foerster, T. Kramer, S. Remund, Influence of the burst mode onto the specific removal rate for metals and semiconductors, *Journal of Laser Applications* 31 (2019) 22203.
- [24] A.Y. Vorobyev, C. Guo, Direct observation of enhanced residual thermal energy coupling to solids in femtosecond laser ablation, *Appl. Phys. Lett.* 86 (2005) 11916.
- [25] A.Y. Vorobyev, C. Guo, Enhanced absorptance of gold following multipulse femtosecond laser ablation, *Phys. Rev. B* 72 (2005).
- [26] A.Y. Vorobyev, C. Guo, Enhanced energy coupling in femtosecond laser-metal interactions at high intensities, *Optics express* 14 (2006) 13113–13119.
- [27] A.Y. Vorobyev, V.M. Kuzmichev, N.G. Kokody, P. Kohns, J. Dai, C. Guo, Residual thermal effects in Al following single ns- and fs-laser pulse ablation, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 82 (2006) 357–362.

-
- [28] A.Y. Vorobyev, C. Guo, Thermal response and optical absorptance of metals under femtosecond laser irradiation, *NS* 03 (2011) 488–495.
- [29] F. Bauer, A. Michalowski, T. Kiedrowski, S. Nolte, Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals, *Optics express* 23 (2015) 1035–1043.
- [30] Dipl.Phys. Franziska Bauer, Grundlegende Untersuchungen zum Abtragen von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen, Dissertation, Jena, 2018.
- [31] In-Situ Analysis of Heat Accumulation during Ultrashort Pulsed Laser Ablation, *JLMN* (2020).
- [32] D. Breitling, Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung, Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2009, Utz Wissenschaft, München, 2010.
- [33] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, B. Çetin, D.K. Kesim, Ö. Akçaalan et al., Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature* 537 (2016) 84–88.
- [34] S. Faas, U. Bielke, R. Weber, T. Graf, Prediction of the surface structures resulting from heat accumulation during processing with picosecond laser pulses at the average power of 420 W, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 124 (2018).
- [35] J. Schille, L. Schneider, U. Loeschner, Process optimization in high-average-power ultrashort pulse laser microfabrication: how laser process parameters influence efficiency, throughput and quality, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 120 (2015) 847–855.
- [36] M. Domke, V. Matylitsky, S. Stroj, Surface ablation efficiency and quality of fs lasers in single-pulse mode, fs lasers in burst mode, and ns lasers, *Applied Surface Science* 505 (2020) 144594.
- [37] M. Spellauge, J. Winter, S. Rapp, C. McDonnell, F. Sotier, M. Schmidt et al., Influence of stress confinement, particle shielding and re-deposition on the ultrashort pulse laser ablation of metals revealed by ultrafast time-resolved experiments, *Applied Surface Science* 545 (2021) 148930.
- [38] A. Amouye Foumani, D.J. Förster, H. Ghorbanfekr, R. Weber, T. Graf, A.R. Niknam, Atomistic simulation of ultra-short pulsed laser ablation of metals with single and double pulses: An investigation of the re-deposition phenomenon, *Applied Surface Science* 537 (2021) 147775.
- [39] D.J. Förster, S. Faas, S. Gröninger, F. Bauer, A. Michalowski, R. Weber et al., Shielding effects and re-deposition of material during processing of metals with bursts of ultra-short laser pulses, *Applied Surface Science* 440 (2018) 926–931.
- [40] M.E. Povarnitsyn, T.E. Itina, P.R. Levashov, K.V. Khishchenko, Simulation of ultrashort double-pulse laser ablation, *Applied Surface Science* 257 (2011) 5168–5171.

-
- [41] S.I. Kudryashov, A.A. Samokhvalov, Y.D. Golubev, D.S. Ivanov, M.E. Garcia, V.P. Veiko et al., Dynamic all-optical control in ultrashort double-pulse laser ablation, *Applied Surface Science* 537 (2021) 147940.
- [42] K.-H. Leitz, B. Redlingshöfer, Y. Reg, A. Otto, M. Schmidt, Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses, *Physics Procedia* 12 (2011) 230–238.
- [43] A. Semerok, C. Dutouquet, Ultrashort double pulse laser ablation of metals, *Thin Solid Films* 453-454 (2004) 501–505.
- [44] J. Mildner, C. Sarpe, N. Götte, M. Wollenhaupt, T. Baumert, Emission signal enhancement of laser ablation of metals (aluminum and titanium) by time delayed femtosecond double pulses from femtoseconds to nanoseconds, *Applied Surface Science* 302 (2014) 291–298.
- [45] S. Noël, J. Hermann, Reducing nanoparticles in metal ablation plumes produced by two delayed short laser pulses, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 53120.
- [46] J. Schille, L. Schneider, S. Kraft, L. Hartwig, U. Loeschner, Experimental study on double-pulse laser ablation of steel upon multiple parallel-polarized ultrashort-pulse irradiations, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 122 (2016).
- [47] F. Bauer, Grundlegende Untersuchungen zum Abtragen von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen, Dissertation, Jena, 2018.
- [48] M. Hashida, S. Masuno, Y. Furukawa, M. Kusaba, S. Inoue, S. Sakabe et al., Suppression of ablation by double-pulse femtosecond laser irradiation, in: *Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XVIII*, San Francisco, United States, 2018 - 2018, p. 25.
- [49] K. Takenaka, M. Tsukamoto, M. Hashida, S. Masuno, H. Sakagami, M. Kusaba et al., Ablation suppression of a titanium surface interacting with a two-color double-pulse femtosecond laser beam, *Applied Surface Science* 478 (2019) 882–886.
- [50] N. Ackerl, *Laser Surface Functionalization from Fundamentals to Application*, 2020.
- [51] P. Börner, *Ultra-short pulsed laser ablation of diamond*, 2019.
- [52] Y. Furukawa, S. Inoue, M. Hashida, Temporal change in laser penetration length of titanium and platinum for double-pulse ablation measured by a novel ablation method, *Journal of Laser Applications* 33 (2021) 12023.
- [53] J. König, S. Nolte, A. Tünnermann, Plasma evolution during metal ablation with ultrashort laser pulses, *Optics express* 13 (2005) 10597–10607.
- [54] J. Xiao, P. Liu, C.X. Wang, G.W. Yang, External field-assisted laser ablation in liquid: An efficient strategy for nanocrystal synthesis and nanostructure assembly, *Progress in Materials Science* 87 (2017) 140–220.
- [55] B. Bornschlegel, J.I.-S. Finger (Eds.), *Analysis of Ultrashort Pulsed Laser Ablation with Pulse Bursts*, Aachen.

-
- [56] N. Hodgson, A. Steinkopff, S. Heming, H. Allegre, H. Haloui, T. Lee et al., Ultrafast laser machining: process optimization and applications, in: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXVI*, Online Only, United States, 2021 - 2021, p. 6.
- [57] A. Žemaitis, M. Gaidys, P. Gečys, M. Barkauskas, M. Gedvilas, Femtosecond laser ablation by bursts in the MHz and GHz pulse repetition rates, *Optics express* 29 (2021) 7641–7653.
- [58] T. Kramer, Increasing the Specific Removal Rate for Ultra Short Pulsed Laser-Micromachining by Using Pulse Bursts, *JLMN* 12 (2017) 107–114.
- [59] A. Brenner, L. Röther, M. Osbild, J. Finger, Laser polishing using ultrashort pulse laser, in: *Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIV*, San Francisco, United States, 2020 - 2020, p. 23.
- [60] P. Lickschat, A. Demba, S. Weissmantel, Ablation of steel using picosecond laser pulses in burst mode, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 123 (2017).
- [61] P. Lickschat, D. Metzner, S. Weißmantel, Burst mode ablation of stainless steel with tunable ultrashort laser pulses, *Journal of Laser Applications* 33 (2021) 22005.
- [62] T. Herrmann, F. Harth, B. Henrich, J. L'huillier, M. Hajri, How to Improve Efficiency in USP Laser Micromachining, *LTJ* 13 (2016) 16–19.
- [63] D. Lober, Stahl für Metallografen, [May 21, 2018], <http://www.lober-net.de/metallograf/start.htm?/metallograf/werkstoffkartei/4313/4313-2.htm>.
- [64] M. Feurer, J. Lueg, H. Schürmann (Eds.), *Stahl-Lexikon: Ein material-, produkt- und anarbeitungskundliches Nachschlagewerk für den Stahlhandel*, 27., vollst. neu bearb. Aufl., 69. - 71. Tsd, Bundesverb. Dt. Stahlhandel, Düsseldorf, 2009.
- [65] S.M. Hertweck, *Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung: Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen*, [1. Auflage], Meisenbach GmbH Verlag, Bamberg, 2017.
- [66] J. Schille, *Investigation of micromachining using a high repetition rate femtosecond fibre laser*, Dissertation, Manchester, 2013.
- [67] D. Metzner, P. Lickschat, S. Weißmantel, Laser micromachining of silicon and cemented tungsten carbide using picosecond laser pulses in burst mode: ablation mechanisms and heat accumulation, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 125 (2019).
- [68] E.J.Y. Ling, J. Saïd, N. Brodusch, R. Gauvin, P. Servio, A.-M. Kietzig, Investigating and understanding the effects of multiple femtosecond laser scans on the surface topography of stainless steel 304 and titanium, *Applied Surface Science* 353 (2015) 512–521.
- [69] P. Mannion, J. Magee, E. Coyne, G. O'Connor, T. Glynn, The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage

-
- morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air, *Applied Surface Science* 233 (2004) 275–287.
- [70] B.K. Nayak, M.C. Gupta, Ultrafast laser-induced self-organized conical micro/nano surface structures and their origin, *Optics and Lasers in Engineering* 48 (2010) 966–973.
- [71] N. Ackerl, G. Fisch, J. Auerswald, K. Wegener, Evolution of microstructures on stainless steel induced by ultra-short pulsed laser ablation, *SN Appl. Sci.* 2 (2020).

8 Anhang

Tabelle 1: Oberflächenrauheiten der Strukturböden bei der Verwendung von ultrakurzen Einzelpulsen in Abhängigkeit von der Fluenz

Betriebsart	Fluenz in J/cm ²	1,0	2,0	4,0	8,0
EP	Sa in nm	458	919	2107	4602
	Sq in nm	563	1156	2566	5580
	Sz in nm	4952	9712	14686	30074

Tabelle 2: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und den daraus berechneten Abtragsvolumen bzw. Abtragungseffizienzen für einen Fluenzbereich von 0,75 J/cm² bis 8 J/cm² bei Verwendung des Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen

Betriebsart	Fluenz in J/cm ²	Pulsenergie in µJ	Abtragstiefe in µm	Abtragsvolumen in µm ³	Abtragungseffizienz in µm ³ /µJ
Einzelpuls	0,75	2,6	3,86	4,63	1,78
	1,0	3,4	4,82	5,78	1,70
	1,5	5,3	6,37	7,65	1,44
	2,0	7,0	7,19	8,63	1,23
	3,0	10,5	9,48	11,38	1,08
	4,0	14,0	10,72	12,86	0,92
	6,0	21,0	14,35	17,21	0,82
	8,0	28,0	15,72	18,86	0,67

Tabelle 3: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtrageffizienzen für eine Gesamtfluenz von $1,5 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25).

Burst (N=2)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtrageffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3
	1. Puls	2. Puls						
1,5 J/cm^2	50	50	12,5	7,71	9,25	1,75	4,6	4,62
			25,0	8,08	9,69	1,83	4,6	5,06
			37,5	8,31	9,97	1,88	4,6	5,34
			50,0	8,34	10,01	1,89	4,6	5,38
			62,5	8,38	10,05	1,90	4,6	5,42
			75,0	8,26	9,92	1,87	4,6	5,29
			87,5	8,46	10,15	1,91	4,6	5,52
	25	75	12,5	6,96	8,36	1,58		
			25,0	7,28	8,74	1,65		
			37,5	7,38	8,85	1,67		
			50,0	7,54	9,05	1,71		
			62,5	7,53	9,03	1,70		
			75,0	7,49	8,99	1,70		
			87,5	7,48	8,98	1,69		
	75	25	12,5	6,11	7,33	1,38		
			25,0	6,12	7,34	1,39		
			37,5	5,85	7,02	1,33		
			50,0	6,26	7,51	1,42		
			62,5	6,38	7,65	1,44		
			75,0	6,50	7,80	1,47		
			87,5	6,54	7,85	1,48		

Tabelle 4: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtrageffizienzen für eine Gesamtfluenz von $2,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulspulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25).

Burst (N=2)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtrageffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3
	1. Puls	2. Puls						
2,0 J/cm^2	50	50	12,5	9,79	11,75	1,68	5,8	5,97
			25,0	10,64	12,76	1,82	5,8	6,98
			37,5	10,95	13,14	1,88	5,8	7,36
			50,0	-	-	-	-	-
			62,5	-	-	-	-	-
			75,0	-	-	-	-	-
			87,5	-	-	-	-	-
	25	75	12,5	-	-	-	-	-
			25,0	-	-	-	-	-
			37,5	-	-	-	-	-
			50,0	-	-	-	-	-
			62,5	-	-	-	-	-
			75,0	-	-	-	-	-
			87,5	-	-	-	-	-
	75	25	12,5	-	-	-	-	-
			25,0	-	-	-	-	-
			37,5	-	-	-	-	-
			50,0	-	-	-	-	-
			62,5	-	-	-	-	-
			75,0	-	-	-	-	-
			87,5	-	-	-	-	-

Tabelle 5: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtrageffizienzen für eine Gesamtfluenz von $3,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25).

Burst (N=2)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtrageffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3
	1. Puls	2. Puls						
3,0 J/cm^2	50	50	12,5	12,73	15,27	1,45	7,6	7,63
			25,0	13,73	16,47	1,57	7,6	8,83
			37,5	14,33	17,20	1,64	7,6	9,55
			50,0	14,69	17,63	1,68	7,6	9,99
			62,5	14,75	17,70	1,69	7,6	10,05
			75,0	14,72	17,67	1,68	7,6	10,02
			87,5	14,68	17,61	1,68	7,6	9,97
	25	75	12,5	11,46	13,76	1,31		
			25,0	11,38	13,65	1,30		
			37,5	12,36	14,84	1,41		
			50,0	13,10	15,72	1,50		
			62,5	13,05	15,66	1,49		
			75,0	13,52	16,23	1,55		
			87,5	13,49	16,19	1,54		
	75	25	12,5	11,46	13,75	1,31		
			25,0	11,34	13,61	1,30		
			37,5	11,55	13,86	1,32		
			50,0	11,97	14,36	1,37		
			62,5	12,04	14,44	1,38		
			75,0	12,10	14,52	1,38		
			87,5	12,17	14,60	1,39		

Tabelle 6: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $4,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulspulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25).

Burst (N=2)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtragseffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3
	1. Puls	2. Puls						
4,0 J/cm^2	50	50	12,5	15,00	18,00	1,29	8,6	9,37
			25,0	15,18	18,22	1,30	8,6	9,59
			37,5	16,16	19,39	1,38	8,6	10,76
			50,0	-	-	-	-	-
			62,5	-	-	-	-	-
			75,0	-	-	-	-	-
			87,5	-	-	-	-	-
	25	75	12,5	-	-	-	-	-
			25,0	-	-	-	-	-
			37,5	-	-	-	-	-
			50,0	-	-	-	-	-
			62,5	-	-	-	-	-
			75,0	-	-	-	-	-
			87,5	-	-	-	-	-
	75	25	12,5	-	-	-	-	-
			25,0	-	-	-	-	-
			37,5	-	-	-	-	-
			50,0	-	-	-	-	-
			62,5	-	-	-	-	-
			75,0	-	-	-	-	-
			87,5	-	-	-	-	-

Tabelle 7: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtrageffizienzen für eine Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulspulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25).

Burst (N=2)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtrageffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3
	1. Puls	2. Puls						
6,0 J/cm^2	50	50	12,5	17,38	20,86	0,99	11,4	9,48
			25,0	16,07	19,28	0,92	11,4	7,91
			37,5	16,32	19,58	0,93	11,4	8,20
			50,0	17,91	21,50	1,02	11,4	10,12
			62,5	17,15	20,58	0,98	11,4	9,20
			75,0	18,64	22,36	1,06	11,4	10,99
			87,5	19,14	22,97	1,09	11,4	11,59
	25	75	12,5	13,37	16,04	0,76		
			25,0	14,83	17,80	0,85		
			37,5	15,23	18,28	0,87		
			50,0	16,23	19,47	0,93		
			62,5	16,93	20,32	0,97		
			75,0	17,04	20,45	0,97		
			87,5	17,06	20,48	0,98		
	75	25	12,5	16,97	20,36	0,97		
			25,0	18,12	21,75	1,04		
			37,5	18,47	22,16	1,06		
			50,0	18,59	22,31	1,06		
			62,5	18,83	22,60	1,08		
			75,0	18,70	22,44	1,07		
			87,5	18,74	22,48	1,07		

Tabelle 8: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen (für den ersten Puls P_1 und den zweiten Puls P_2) bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Doppelpulspulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (50/50), ansteigend (25/75) und absteigend (75/25).

Burst (N=2)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtragseffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3
	1. Puls	2. Puls						
8,0 J/cm^2	50	50	12,5	18,90	22,68	0,81	12,9	9,82
			25,0	17,63	21,15	0,76	12,9	8,29
			37,5	18,85	22,62	0,81	12,9	9,76
			50,0	19,36	23,23	0,83	12,9	10,37
			62,5	19,87	23,85	0,85	12,9	10,98
			75,0	21,62	25,94	0,93	12,9	13,08
			87,5	21,38	25,66	0,92	12,9	12,79
	25	75	12,5	12,97	15,56	0,56		
			25,0	17,72	21,26	0,76		
			37,5	18,06	21,67	0,77		
			50,0	17,54	21,05	0,75		
			62,5	17,46	20,95	0,75		
			75,0	18,25	21,90	0,78		
			87,5	18,86	22,63	0,81		
	75	25	12,5	20,17	24,21	0,86		
			25,0	21,77	26,13	0,93		
			37,5	22,37	26,85	0,96		
			50,0	21,90	26,28	0,94		
			62,5	21,63	25,95	0,93		
			75,0	21,17	25,40	0,91		
			87,5	22,20	26,64	0,95		

Tabelle 9: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen bzw. Abtrageffizienzen für eine Gesamtfluenz von 6,0 J/cm² unter Verwendung des Burst-Modus mit drei ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von 12,5 ns bis 37,5 ns. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (33,3/33,3/33,3), ansteigend (14,3/28,6/57,1) und absteigend (57,1/28,6/14,3).

Burst (N=3)	Verhältnis je Puls an der Gesamt-fluenz in %			zeitlicher Puls-ab- stand in ns	Abtrags- tiefe in µm	Abtrags- volumen in µm ³	Abtrags- effizienz in µm ³ /µJ)
	1. Puls	2. Puls	3. Puls				
6,0 J/cm ²	33,3	33,3	33,3	12,5	23,31	27,97	1,33
				25,0	25,96	31,15	1,48
				37,5	25,15	30,18	1,44
	14,3	28,6	57,1	12,5	16,54	19,85	0,95
				25,0	21,47	25,76	1,23
				37,5	23,64	28,36	1,35
	57,1	28,6	14,3	12,5	23,43	28,12	1,34
				25,0	21,76	26,11	1,24
				37,5	20,46	24,56	1,17

Tabelle 10: Berechnete Abtragsvolumen für den ersten Puls P₁, zweiten Puls P₂ und dritten Puls P₃ für eine Gesamtfluenz von 6,0 J/cm² unter Verwendung des Burst-Modus mit drei ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts im Bereich von 12,5 ns bis 37,5 ns. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (33,3/33,3/33,3), ansteigend (14,3/28,6/57,1) und absteigend (57,1/28,6/14,3).

Burst (N=3)	Verhältnis je Puls an der Gesamt-fluenz in %			zeitlicher Puls-ab- stand in ns	P ₁ in µm ³	P ₂ in µm ³	P ₃ in µm ³
	1. Puls	2. Puls	3. Puls				
6,0 J/cm ²	33,3	33,3	33,3	12,5	8,6	9,37	9,97
				25,0	8,6	9,59	12,93
				37,5	8,6	10,76	10,79
	14,3	28,6	57,1	12,5	-	-	-
				25,0	-	-	-
				37,5	-	-	-
	57,1	28,6	14,3	12,5	-	-	-
				25,0	-	-	-
				37,5	-	-	-

Tabelle 11: Ermittelte Werte der Abtragstiefen und die daraus berechneten Abtragsvolumen bzw. Abtragseffizienzen für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Burst-Modus mit vier ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts mit $12,5 \text{ ns}$ und $25,0 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (25/25/25/25), ansteigend (7,7/15,4/30,8/46,2) und absteigend (46,2/30,8/15,4/7,7).

Burst (N=4)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %				zeitlicher Pulsabstand in ns	Abtragstiefe in μm	Abtragsvolumen in μm^3	Abtragseffizienz in $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$
	1. Puls	2. Puls	3. Puls	4. Puls				
8,0 J/cm^2	25,0	25,0	25,0	25,0	12,5	31,03	37,23	1,33
					25,0	33,54	40,25	1,44
	7,7	15,4	30,8	46,2	12,5	24,12	28,95	1,03
					25,0	24,10	28,91	1,03
	46,2	30,8	15,4	7,7	12,5	29,54	35,45	1,27
					25,0	30,30	36,36	1,30

Tabelle 12: Berechnete Abtragsvolumen für den ersten Puls P_1 , zweiten Puls P_2 , dritten Puls P_3 und vierten Puls P_4 für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ unter Verwendung des Burst-Modus mit vier ultrakurzen Pulsen bei der Variation des zeitlichen Pulsabstandes innerhalb eines Bursts mit $12,5 \text{ ns}$ und $25,0 \text{ ns}$. Die energetische Verteilung erfolgte jeweils gleichmäßig (25/25/25/25), ansteigend (7,7/15,4/30,8/46,2) und absteigend (46,2/30,8/15,4/7,7).

Burst (N=4)	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %				zeitlicher Pulsabstand in ns	P_1 in μm^3	P_2 in μm^3	P_3 in μm^3	P_4 in μm^3
	1. Puls	2. Puls	3. Puls	4. Puls					
8,0 J/cm^2	25,0	25,0	25,0	25,0	12,5	8,6	9,37	9,97	9,26
					25,0	8,6	9,59	12,93	9,10
	7,7	15,4	30,8	46,2	12,5	-	-	-	-
					25,0	-	-	-	-
	46,2	30,8	15,4	7,7	12,5	-	-	-	-
					25,0	-	-	-	-

Tabelle 13: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für einen Fluenzbereich von $0,75 \text{ J/cm}^2$ bis 8 J/cm^2 bei Verwendung des Einzelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen

Betriebsart	Fluenz in J/cm^2	d in μm	S_a in nm	S_q in nm	S_z in nm
Einzelpuls	0,75	3,86	357	438	4791
	1,00	4,82	458	563	4952
	1,50	6,37	736	937	9005
	2,00	7,19	919	1156	9712
	3,00	9,48	1323	1693	12126
	4,00	10,72	2107	2566	14686
	6,00	14,35	3292	4025	21395
	8,00	15,72	4602	5580	30074

Tabelle 14: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für die Gesamtfluenzen $1,5 \text{ J/cm}^2$ und $2,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$

Betriebsart		Doppelpuls (Burst (N=2))								
Gesamtfluenz in J/cm^2	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		Messwert	zeitlicher Pulsabstand in ns						
	1. Puls	2. Puls		12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	87,5
1,5	50	50	d in μm	7,71	8,08	8,31	8,34	8,38	8,26	8,46
			S_a in nm	569	667	672	653	646	639	630
			S_q in nm	716	831	836	813	804	794	782
			S_z in nm	6351	6612	6854	6306	6201	5849	5942
	25	75	d in μm	6,96	7,28	7,38	7,54	7,53	7,49	7,48
			S_a in nm	529	587	598	579	574	576	578
			S_q in nm	670	740	753	729	732	726	727
			S_z in nm	6345	6845	6650	6639	6102	6439	6095
	75	25	d in μm	6,11	6,12	5,85	6,26	6,38	6,50	6,54
			S_a in nm	666	637	586	616	631	629	624
			S_q in nm	831	793	722	765	786	784	783
			S_z in nm	6612	6767	5453	5747	6029	6147	8060
2,0	50	50	d in μm	9,79	10,64	10,95	-	-	-	-
			S_a in nm	631	832	835	-	-	-	-
			S_q in nm	799	1037	1038	-	-	-	-
			S_z in nm	7868	8173	8163	-	-	-	-
	25	75	d in μm	-	-	-	-	-	-	-
			S_a in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_q in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_z in nm	-	-	-	-	-	-	-
	75	25	d in μm	-	-	-	-	-	-	-
			S_a in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_q in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_z in nm	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 15: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für die Gesamtfluenzen $3,0 \text{ J/cm}^2$ und $4,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$

Betriebsart		Doppelpuls (N=2)								
Gesamtfluenz in J/cm^2	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		Messwert	zeitlicher Pulsabstand in ns						
	1. Puls	2. Puls		12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	87,5
3,0	50	50	d in μm	12,73	13,73	14,33	14,69	14,75	14,72	14,68
			S_a in nm	540	1069	1206	1211	1246	1264	1290
			S_q in nm	732	1370	1533	1523	1581	1264	1637
			S_z in nm	7587	9462	11044	10324	13712	13898	12963
	25	75	d in μm	11,46	11,38	12,36	13,10	13,05	13,52	13,49
			S_a in nm	342	910	1042	1099	1114	1101	1105
			S_q in nm	457	1175	1346	1418	1427	1405	1399
			S_z in nm	7199	11443	13335	12923	13004	10627	9768
	75	25	d in μm	11,46	11,34	11,55	11,97	12,04	12,10	12,17
			S_a in nm	1229	1197	1189	1150	1153	1126	1153
			S_q in nm	1557	1506	1519	1468	1479	1315	1466
			S_z in nm	11571	10082	11586	11510	11327	9430	10898
4,0	50	50	d in μm	15,002	15,181	16,158	-	-	-	-
			S_a in nm	463	1565	1825	-	-	-	-
			S_q in nm	664	1996	2314	-	-	-	-
			S_z in nm	6801	13472	15010	-	-	-	-
	25	75	d in μm	-	-	-	-	-	-	-
			S_a in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_q in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_z in nm	-	-	-	-	-	-	-
	75	25	d in μm	-	-	-	-	-	-	-
			S_a in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_q in nm	-	-	-	-	-	-	-
			S_z in nm	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 16: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für die Gesamtfluenzen $6,0 \text{ J/cm}^2$ und $8,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Doppelpulsmodus mit ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $87,5 \text{ ns}$

Betriebsart		Doppelpuls (N=2)								
Gesamtfluenz in J/cm^2	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %		Messwert	zeitlicher Pulsabstand in ns						
	1. Puls	2. Puls		12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	87,5
6,0	50	50	d in μm	17,381	16,069	16,316	17,914	17,148	18,636	19,141
			S_a in nm	349	2566	3802	4109	3921	4220	4033
			S_q in nm	488	3051	4592	5001	4472	5177	4884
			S_z in nm	6366	13545	22069	22452	21080	25151	24644
	25	75	d in μm	13,368	14,830	15,231	16,227	16,931	17,038	17,064
			S_a in nm	139	2333	2617	3059	3530	3416	3575
			S_q in nm	180	2849	3200	3774	4391	4162	4396
			S_z in nm	4621	15508	17563	19356	24694	18724	24205
	75	25	d in μm	16,968	18,124	18,467	18,589	18,834	18,702	18,735
			S_a in nm	3233	3108	3180	3363	3230	3301	3079
			S_q in nm	3957	3774	3898	4124	3926	4118	3815
			S_z in nm	19830	17973	21187	20756	18616	23517	21665
8,0	50	50	d in μm	18,904	17,627	18,850	19,360	19,874	21,617	21,380
			S_a in nm	991	2535	4271	4986	5136	4932	4888
			S_q in nm	1256	2980	5025	5914	6130	5846	5792
			S_z in nm	9034	12723	22647	27360	27947	24965	25583
	25	75	d in μm	12,968	17,716	18,060	17,541	17,462	18,247	18,859
			S_a in nm	246	237	3097	3556	4189	4660	4959
			S_q in nm	366	316	3776	4282	5081	5652	6116
			S_z in nm	4686	3899	19165	20802	26004	27393	32561
	75	25	d in μm	20,173	21,771	22,374	21,901	21,628	21,168	22,202
			S_a in nm	5517	5155	4610	4741	4879	4603	4495
			S_q in nm	6517	6229	5508	5639	5950	5533	5364
			S_z in nm	32657	30018	25999	25237	28965	26067	26763

Tabelle 17: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für eine Gesamtfluenz von $6,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Multipulsmodus mit drei ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts im Bereich von $12,5 \text{ ns}$ bis $37,5 \text{ ns}$

Betriebsart		Burst (N=3)					
Gesamtfluenz in J/cm^2	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %			Messwert	zeitlicher Abstand zwischen den Pulsen in ns		
	1. Puls	2. Puls	3. Puls		12,5	25,0	37,5
6	33,3	33,3	33,3	d in μm	23,31	25,96	25,15
				S_a in nm	155	212	1147
				S_q in nm	197	282	1536
				S_z in nm	3549	4929	11395
	14,3	28,6	57,1	d in μm	16,54	21,47	23,64
				S_a in nm	147	166	626
				S_q in nm	188	209	950
				S_z in nm	3255	3656	9780
	57,1	28,6	14,3	d in μm	23,43	21,76	20,46
				S_a in nm	248	2072	3128
				S_q in nm	325	2687	3924
				S_z in nm	4202	16694	23833

Tabelle 18: Ermittelte Werte der Abtragstiefen d und Oberflächenrauheiten S für eine Gesamtfluenz von $8,0 \text{ J/cm}^2$ bei Verwendung des Multipulsmodus mit vier ultrakurzen Pulsen bei Variation der zeitlichen Pulsabstände innerhalb eines Bursts für mit $12,5 \text{ ns}$ und $25,0 \text{ ns}$

Betriebsart		Burst (N=4)					
Gesamtfluenz in J/cm^2	Verhältnis je Puls an der Gesamtfluenz in %				Messwert	zeitlicher Abstand zwischen den Pulsen in ns	
	1. Puls	2. Puls	3. Puls	4. Puls		12,5	25,0
8	25,0	25,0	25,0	25,0	d in μm	31,03	33,54
					S_a in nm	201	216
					S_q in nm	288	276
					S_z in nm	5086	3698
	7,7	15,4	30,8	46,2	d in μm	24,12	24,10
					S_a in nm	219	170
					S_q in nm	272	215
					S_z in nm	3551	3118
	46,2	30,8	15,4	7,7	d in μm	29,54	30,30
					S_a in nm	156	307
					S_q in nm	200	429
					S_z in nm	3518	5892

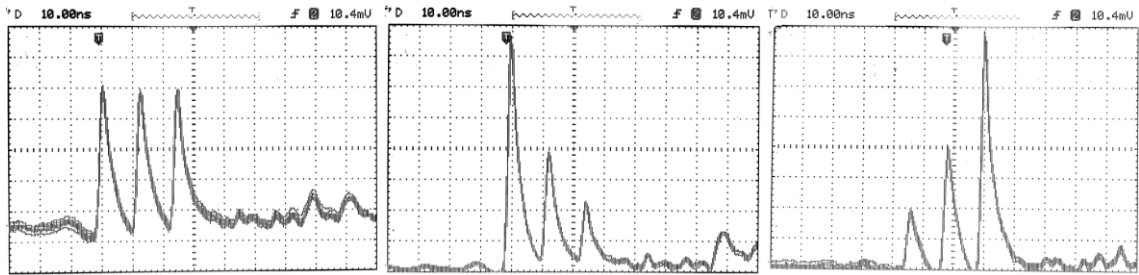


Abbildung 59: Darstellung der Energieverteilung Anhand eines Oszilloskops für den Burst-Modus mit drei Pulsen innerhalb eines Bursts (Gleiche Energieverteilung links, absteigende Energieverteilung mittig und ansteigende Energieverteilung rechts).

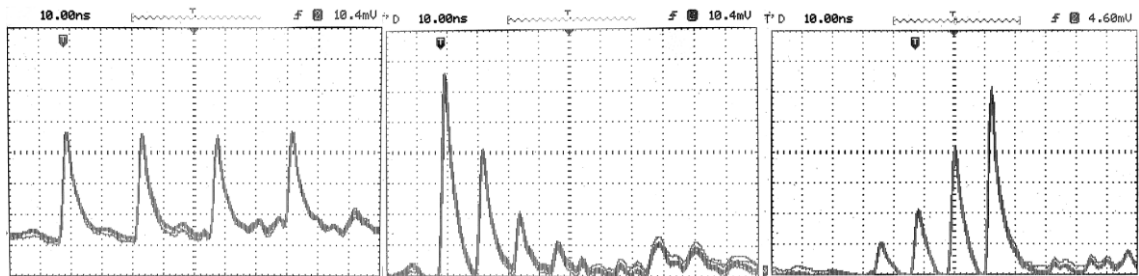


Abbildung 60: Darstellung der Energieverteilung Anhand eines Oszilloskops für den Burst-Modus mit vier Pulsen innerhalb eines Bursts (Gleiche Energieverteilung links, absteigende Energieverteilung mittig und ansteigende Energieverteilung rechts).

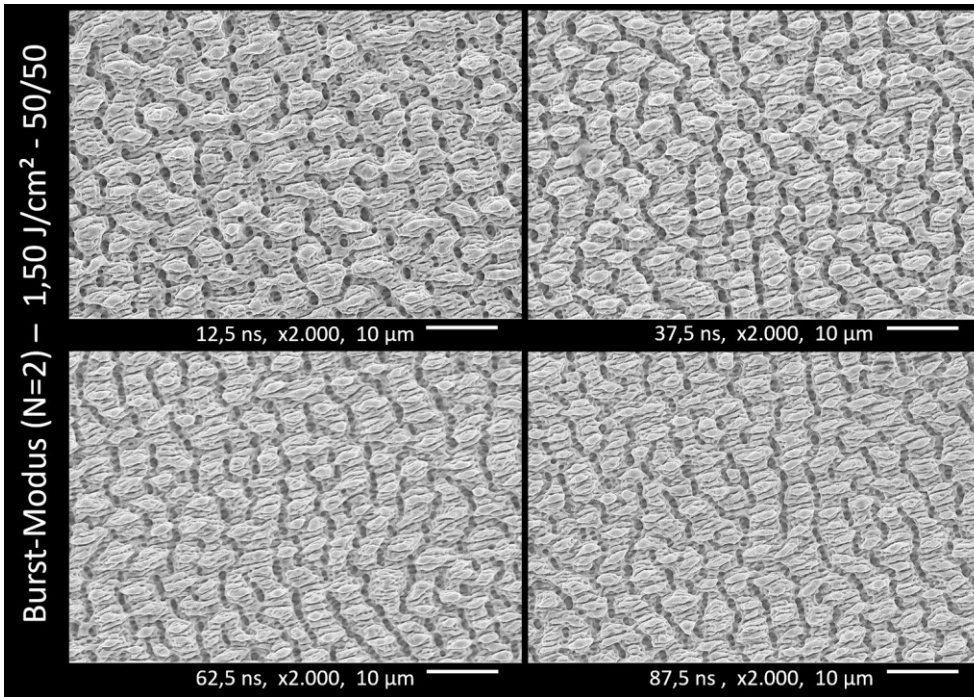


Abbildung 61: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $1,50 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls).

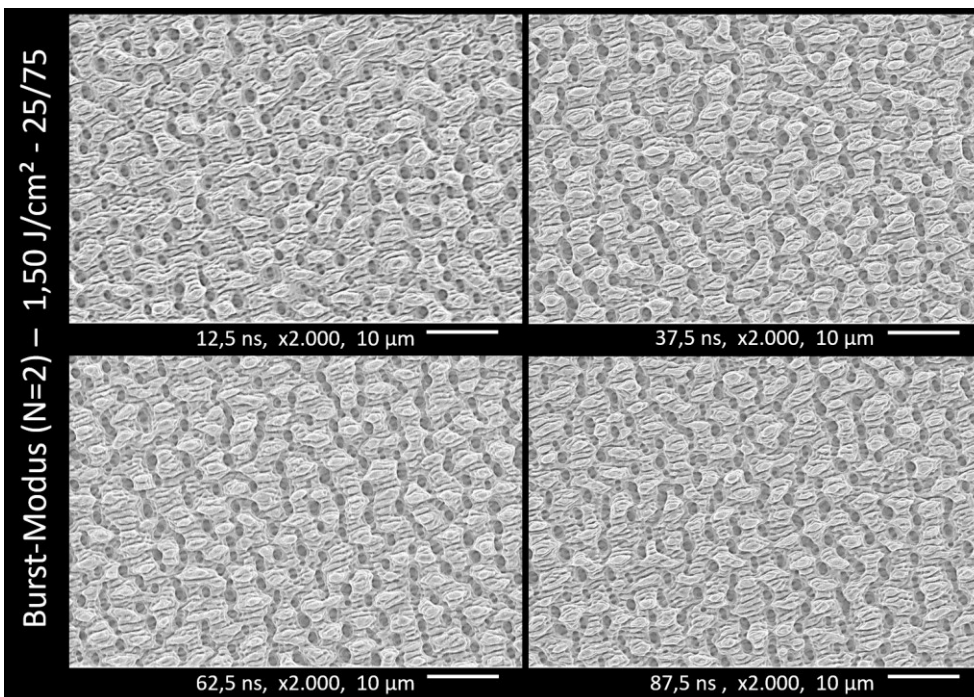


Abbildung 62: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $1,50 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls).

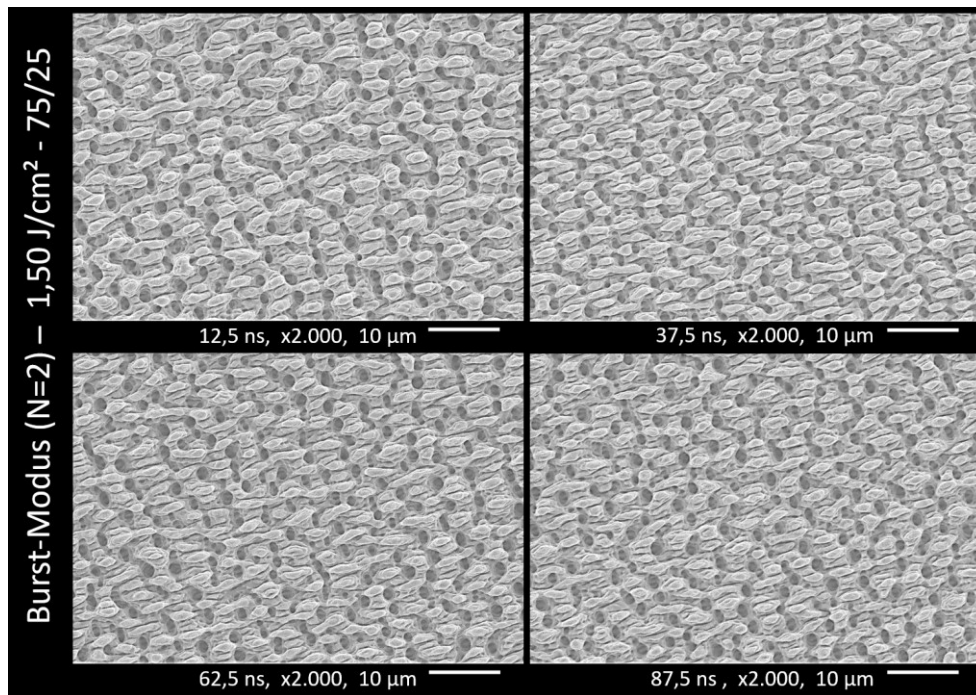


Abbildung 63: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von 1,50 J/cm² und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von 3/4 (erster Puls) zu 1/4 (zweiter Puls).

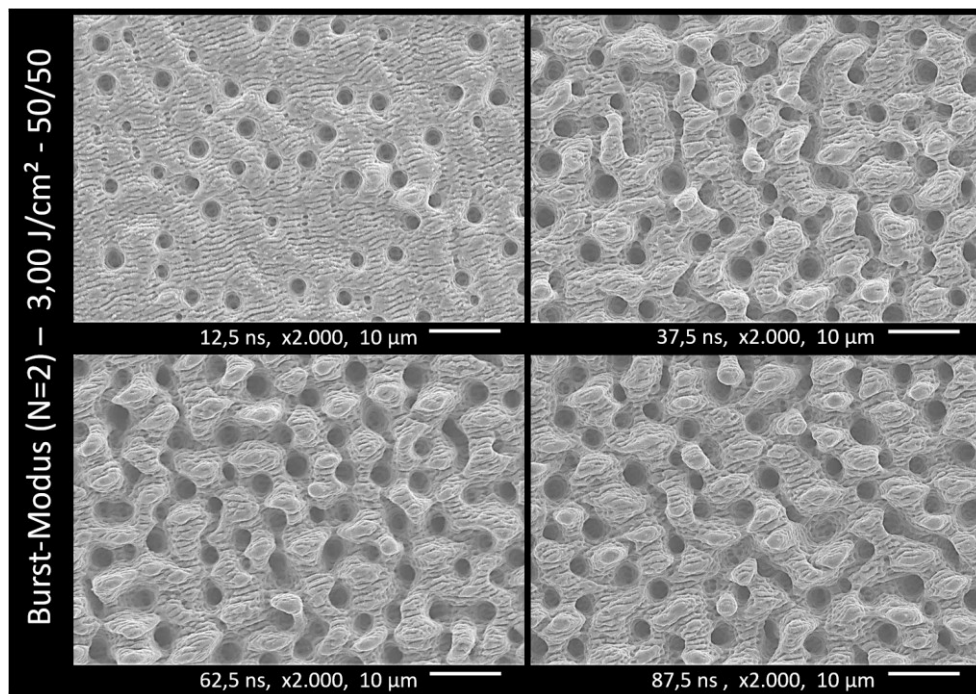


Abbildung 64: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von 3,00 J/cm² und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von 1/2 (erster Puls) und 1/2 (zweiter Puls).

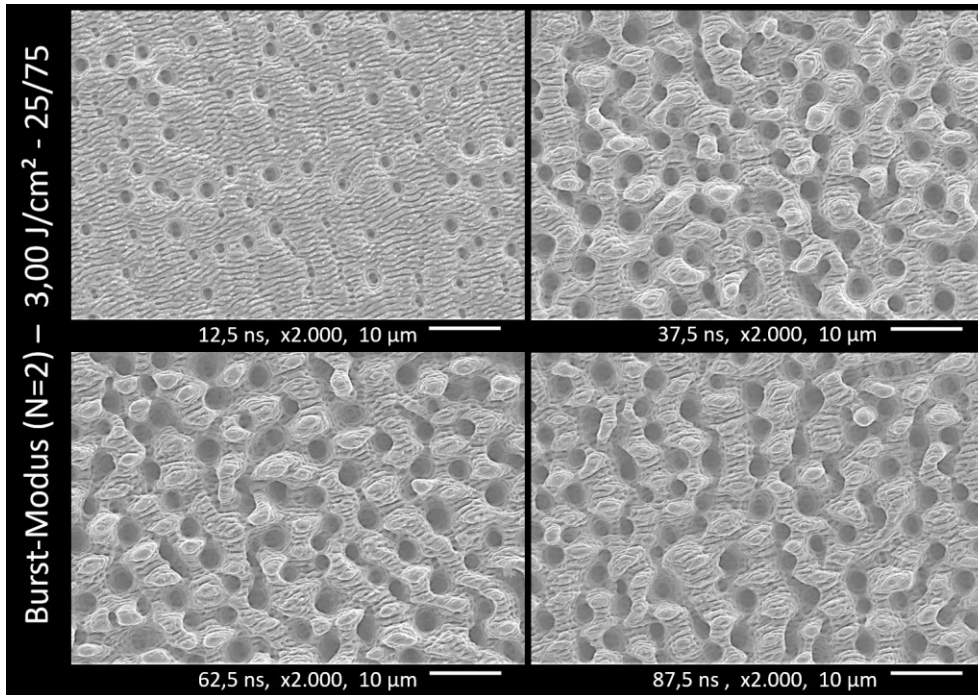


Abbildung 65: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von 3,00 J/cm² und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von 1/4 (erster Puls) zu 3/4 (zweiter Puls).

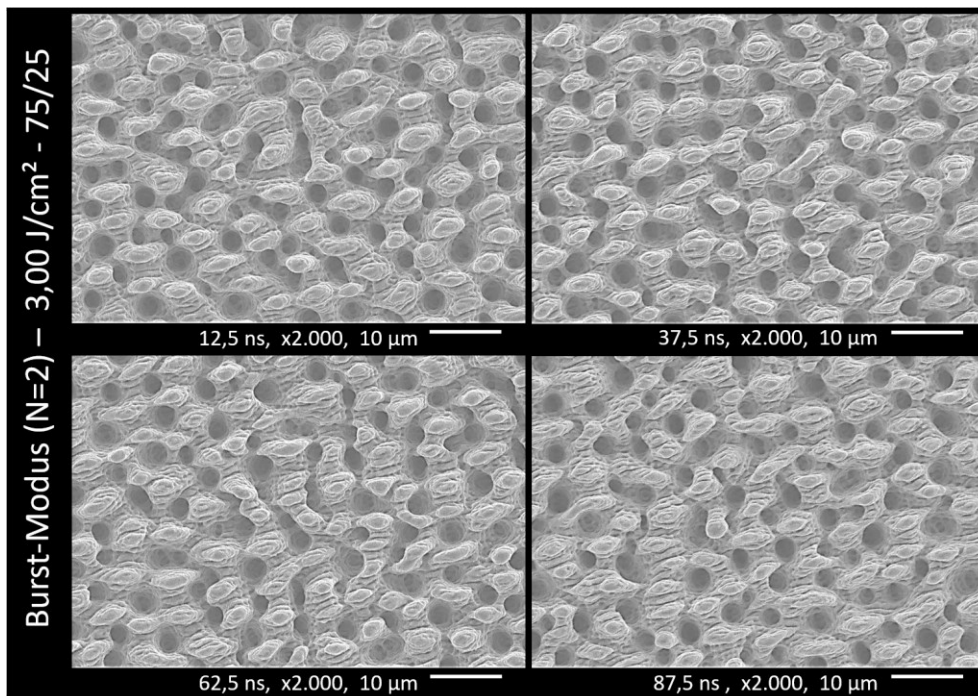


Abbildung 66: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von 3,00 J/cm² und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von 3/4 (erster Puls) zu 1/4 (zweiter Puls).

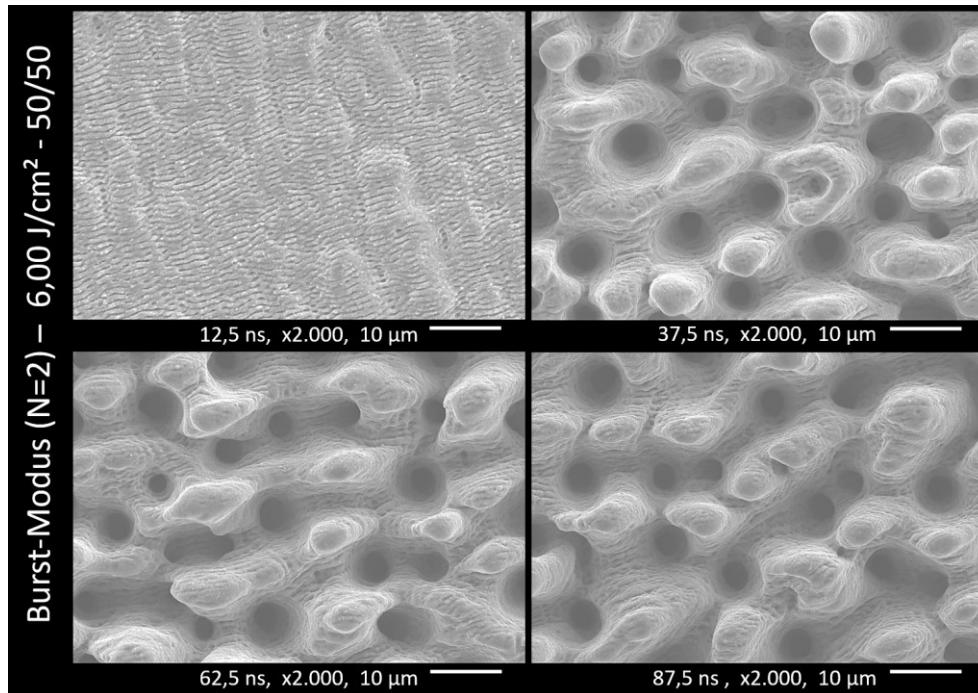


Abbildung 67: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $6,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte gleichmäßig nach der Aufteilung von $1/2$ (erster Puls) und $1/2$ (zweiter Puls).

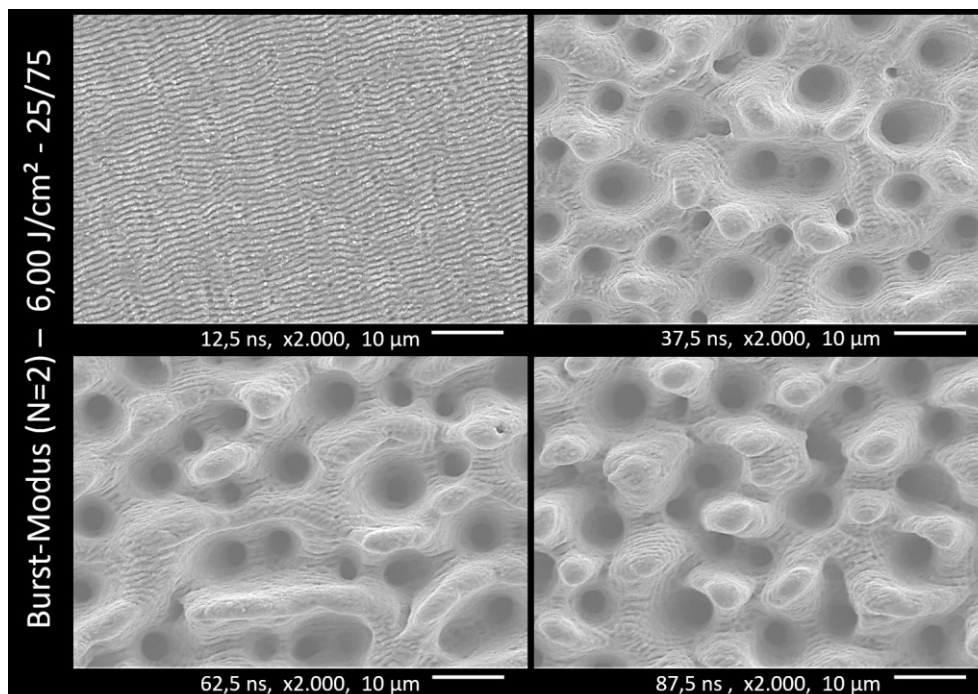


Abbildung 68: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $3,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls).

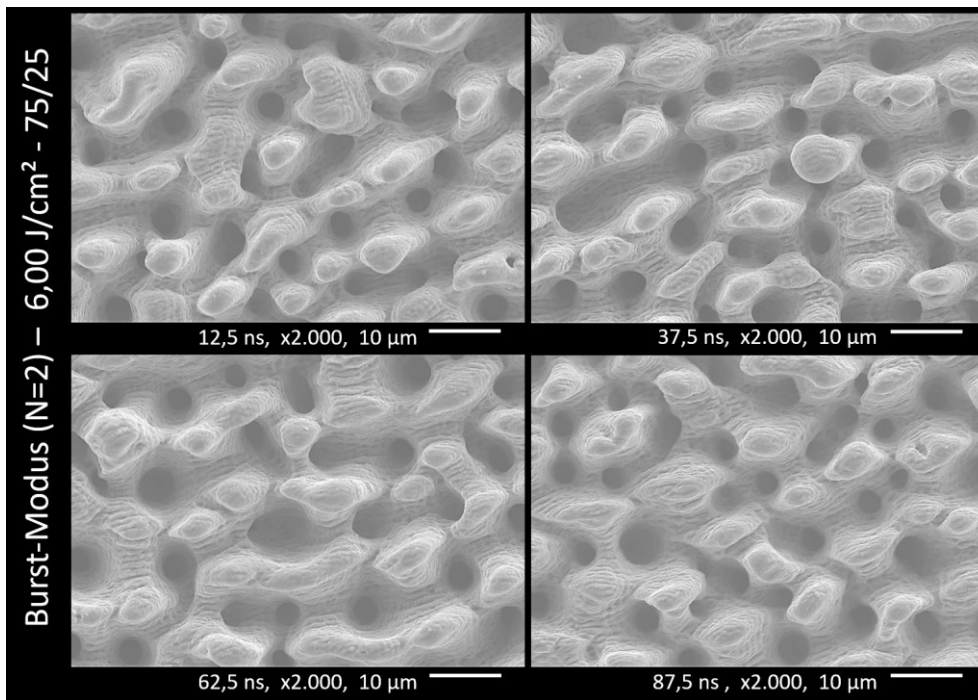


Abbildung 69: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $6,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von $3/4$ (erster Puls) zu $1/4$ (zweiter Puls).

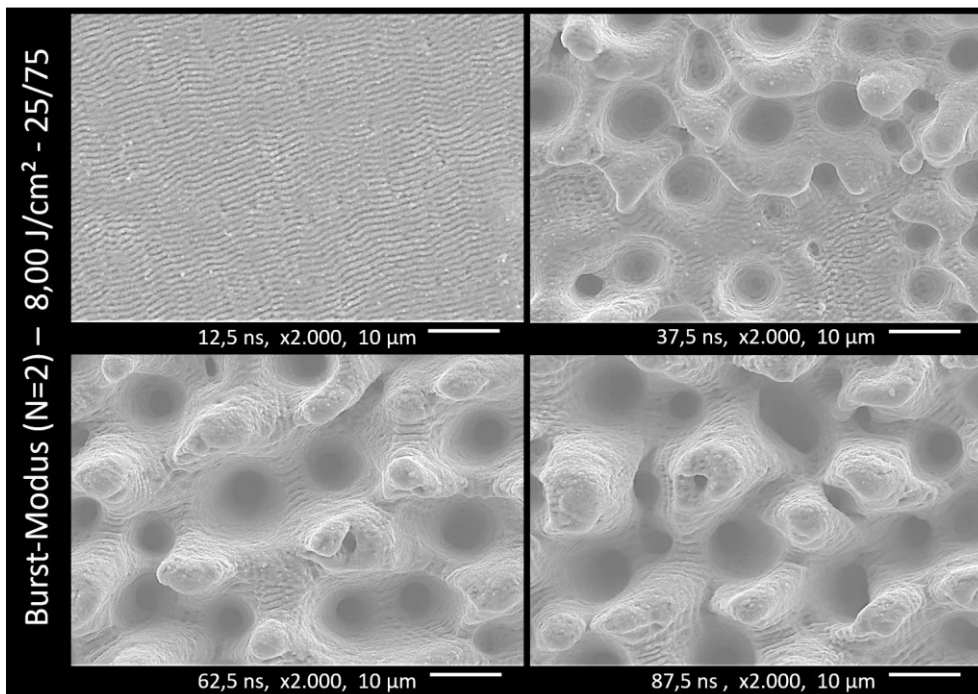


Abbildung 70: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von $8,00 \text{ J/cm}^2$ und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte ansteigend nach der Aufteilung von $1/4$ (erster Puls) zu $3/4$ (zweiter Puls).

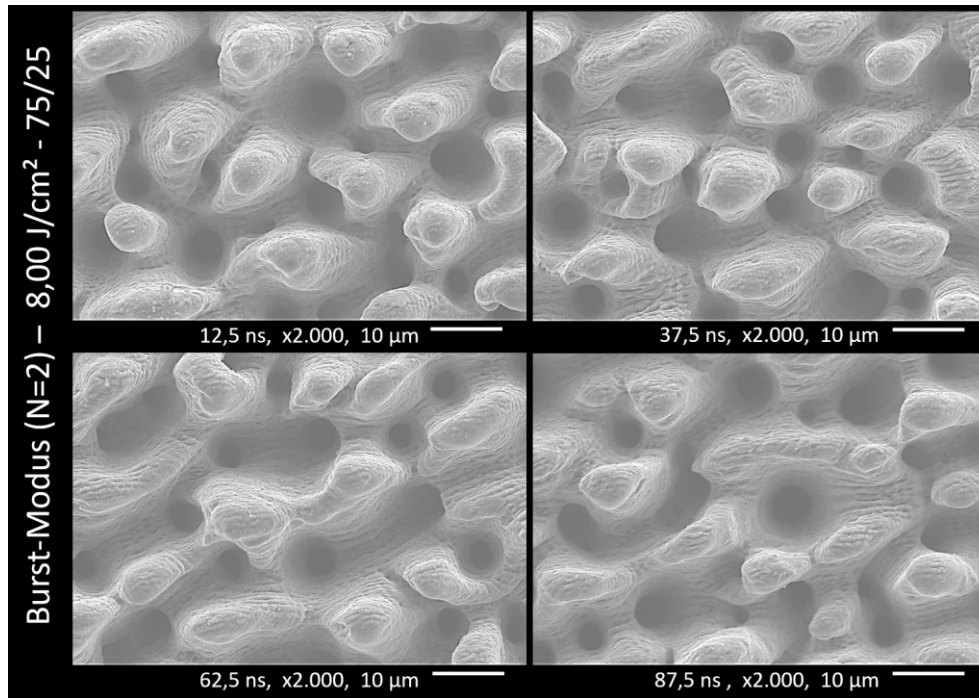


Abbildung 71: Gegenüberstellung der Strukturbilder im Burst-Modus mit zwei Pulsen bei einer Gesamtfluenz von 8,00 J/cm² und unter Variation des zeitlichen Pulsabstandes. Die Energieverteilung erfolgte absteigend nach der Aufteilung von 3/4 (erster Puls) zu 1/4 (zweiter Puls).

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle meinen Dank an Herr Prof. Dr. rer. nat. S. Weißmantel, welcher mir die Möglichkeit gegeben hat ein sehr schönes und auch ergiebiges Thema für meine Bachelorarbeit zu bearbeiten, Herrn P. Lickschat M.Sc, der es Verstand mir mit so mancher Spitze den richtigen Grundstein für einen Sachverhalt zu legen und insbesondere Herrn D. Metzner M.Sc., welcher mir stets mit Rat und Tat und vor allem aber mit einer immensen Geduld zu meiner Seite stand, ausdrücken.

Wie für einen Studentenalltag üblich ist, wird man von einer schier unendlichen Welle an zu verarbeitenden Informationen regelrecht Erschlagen. Damit man jedoch nicht ganz und gar kein Licht mehr zu sehen bekommt, wurde häufig auch eine helfende Hand gereicht, von der ich hoffe das sie von mir nicht überstrapaziert wurde. Durch die lockere aber dennoch stets bestimmte Arbeitsweise, war das erfüllen des Pensums nicht nur von kräftezehrender Plackerei bestimmt, sondern machte mir durchaus bis zum Abschluss dieser letzten Zeilen sehr viel Freude.

Zum guter Letzt möchte ich meinen Dank noch allen Personen des Laserinstituts der Hochschule Mittweida aussprechen, welche mich bis hierhin unterstützt haben.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname